

DIE ERFORSCHUNG DER MATERIE

DAS NEUTRON

von DONALD J. HUGHES

Eine Taschenbuch-Originalausgabe bei Desch

DAS NEUTRON

Die Erforschung der Materie

Band W 1
der Sammlung NATUR UND WISSEN,
eine Taschenbuch-Originalausgabe

Umschlagbild: Mögliche Bahnen eines Protons (blau) und eines Neutrons (rot) beim Einschießen in eine Gruppe von Atomen

DAS NEUTRON

DIE ERFORSCHUNG DER MATERIE

THE NEUTRON STORY

von

DONALD J. HUGHES

NATUR UND WISSEN
Die moderne Naturwissenschaft in Einzeldarstellungen
IM VERLAG KURT DESCH

Titel der amerikanischen Ausgabe
THE NEUTRON STORY
Exploring the Nature of Matter.
Ins Deutsche übertragen von Dr. Eberhard Böhringer

Enrico Fermi gewidmet

Gedruckt in der Buchdruckerei E. C. Baumann KG, Kulmbach
Gebunden in der Buchbinderei Zucker & Co., Erlangen
Umschlag-Entwurf von Wilhelm Heinold, München
Zeichnung des Umschlagbildes von Percy H. Lund
Umschlagdruck von Poerschke & Weiner, München
Printed in Germany 1960

ZUR EINFÜHRUNG

Ein Denken, in welchem die allgemeinen Regeln des gesunden Menschenverstands uns wenig helfen, gar behindern können, hat in wenigen Jahrzehnten eine unseren Sinnen – aber auch der früheren physikalischen Denkweise! – unzugängliche, aus Teilchen und Wellenfeldern bestehende Mikrowelt erschlossen, deren Wesen und Wirken wir heute ebenso sicher zu handhaben verstehen, wie Flugzeuge und Rundfunkwellen. Die Schlüsselstellung in dieser Forschungsrichtung, in der aus ihr entstandenen Technik und schließlich in der gesamten Atomistik hat das *Neutron*.

Bis 1932 war es ein zur Erklärung der Atomgewichte hypothetisch angenommener Bestandteil der Atomkerne; seit 1932 kennt man seine Eigenschaften, z. B. seine Masse, und weiß, daß die Zahl der Neutronen in den Atomkernen gleich der Differenz von Atomgewicht und Ordnungszahl (d. i. Zahl der Protonen) ist. Erst damit wurde das fast hundert Jahre alte und bewährte periodische System der Gewichte von D. Mendelejew und L. Meyer und die Existenz isotoper Atomarten verstanden. Das Neutron hat die uns noch geheimnisvolle Aufgabe, die elektrische Abstoßung der Protonen in den Atomkernen aufzuheben, so daß diese überhaupt stabil sein können; nur bei Umwandlungsprozessen von Atomkernen kann es frei werden – aber es ist nicht mit den üblichen Nachweismethoden wie Geigerzähler oder Wilsonkammer zu entdecken, denn es hat keine elektrische Ladung: Es kann kein Jonisation und keine chemische Reaktion bewirken, es beeindruckt nicht die Photoplatte, es kann nicht zum Leuchten angeregt werden und kein Leuchten anregen; es kann sich nur kraft seiner Masse und seiner Geschwindigkeit – physikalisch gesagt durch Impuls und Energie – beim Auftreffen auf Atomkerne bemerkbar machen.

Gerade auf seiner Ladungsfreiheit beruht seine univer-

selle Bedeutung: alle Bereiche der Mikrowelt sind ihm offen, weil keine noch so starken elektrischen Feldbarrieren ihm den Eintritt versperren. Die Ladungsfreiheit gestattet ihm das Eindringen in Atomkerne; hierdurch wird deren natürliches Zahlenverhältnis von Protonen zu Neutronen geändert, die Kerne werden instabil, es treten Atomumwandlungen auf, wie die Spaltung des Uranatoms, oder es entstehen die künstlich-radioaktiven Atomsorten aus den stabilen Atomarten unserer Welt. Die Ladungsfreiheit bedingt, daß es weite Strecken durch feste Materie ungehindert hindurchfliegen kann, wobei der Dualismus Korpuskel-Welle eindringlicher und überzeugender als bei irgendwelchen anderen »Teilchen« in Erscheinung tritt.

Diesem Neutron widmet der Physiker Donald J. Hughes, welcher mit seinen Forschungsarbeiten entscheidend zur »Weltbedeutung« des Neutrons beitrug, eine kleine Monographie. In bewundernswerter Weise verbindet er physikalische Exaktheit mit im besten Sinne populärer Darstellung. Ohne Formeln, aber mit zahlreichen instruktiven Zeichnungen gibt er dem Leser – gleichsam spielend mit den »unanschaulichen« Begriffen – ein höchst anschauliches Bild von weiten Bereichen der modernen Physik; es wird ihm so leicht als möglich gemacht, in diese Gedanken einzudringen und zugleich zwingend gezeigt, daß weite Bereiche der modernen Technik nur mit diesen neuen „abstrakten" Gedanken entwickelt und genutzt werden können.

Es ist eine erregende Story – auch wer alles im voraus weiß, wird an der Darstellung ästhetischen Genuß haben und aus ihrer Lektüre reichen Gewinn für die Pädagogik des Unterrichts und richtiger Volksbildung ziehen.

WALTHER GERLACH

NATUR UND WISSEN

Die moderne Naturwissenschaft in Einzeldarstellungen

In der Taschenbuchreihe *Natur und Wissen* – einer naturwissenschaftlichen Enzyklopädie in Einzeldarstellungen – machen bedeutende Forscher und Wissenschaftler die Leser vom kleinsten Atom bis zum Universum mit den grundlegenden und wichtigsten Teilgebieten der modernen Naturwissenschaft vertraut. Die Bücher dieser Sammlung berichten von der Bedeutung der Physik für den modernen Menschen, für Technik und Kultur; sie erzählen biographisch von großen Entdeckern und ihren Taten. Für jedes Sachgebiet wurde jeweils eine Kapazität gewonnen, die einen internationalen wissenschaftlichen Ruf mit der Fähigkeit verbindet, ihr Spezialwissen auch Außenstehenden anschaulich zu machen. Hauptziel dieser Taschenbuchreihe ist es, Studenten, Schülern und Laien einen umfassenden Überblick über die moderne Naturwissenschaft zu vermitteln, der mit allen wichtigen Einzelfragen vertraut macht und jeder wissenschaftlichen Kritik standhält. Wir hoffen, daß zudem mancher Leser angeregt wird, seine Kenntnisse auf seinem Spezialgebiet zu vertiefen.

Die Taschenbücher dieser Sammlung gehen von einer neuartigen naturwissenschaftlichen Lehr-Methode aus. Im Massachusetts Institute of Technology gründete im Jahre 1956 eine Gruppe von Forschern, Wissenschaftlern, Lehrern, Journalisten, Konstrukteuren, Lehrfilmproduzenten und anderen Spezialisten das Physical Science Study Committee, das jetzt als Zweig des Educational Services Inc. in

Watertown, Massachusetts, tätig ist. Die Mitglieder des Komitees haben ihre reichen Erkenntnisse und Erfahrungen ausgetauscht. Ihre Bemühungen wurden von Anfang an von der National Science Foundation (Nationaler Wissenschaftsrat) unterstützt. Auch die Fordstiftung, der Fund for the Advancement of Education und die Alfred P. Sloan-Stiftung unterstützen diese Arbeiten.

Die Serie wird vom Ausschuß des Physical Science Study Committee herausgegeben und überwacht, zu dem folgende Mitglieder gehören: Paul F. Brandwein (Conservation Foundation und Harcourt, Brance & Co.), John H. Durston (Educational Services Inc.), Laura Fermi (Schriftstellerin), Francis L. Friedmann (Massachusetts Institute of Technology), Samuel A. Goudsmit (Brookhaven National Laboratory), Bruce F. Kingsbury (Educational Services Inc.), Philippe le Corbeiller (Harvard University), Gerard Piel (Scientific American) und Herbert S. Zim (Simon and Schuster Inc.).

Ende 1959 erschienen die ersten drei Bände dieser allgemeinverständlichen und instruktiven Reihe in den USA. Anfang 1960 folgten die ersten Auslandsausgaben in Deutschland, England, Frankreich, Italien, den Niederlanden und den skandinavischen Staaten. So wurde diese Taschenbuchreihe in kurzer Zeit ein wesentlicher Vermittler internationaler Forschungs- und Arbeitsergebnisse und ein wachsendes Kompendium der modernen Naturwissenschaft.

VORWORT

Ich hatte das besondere Glück, alles, was ich vom Neutron weiß, direkt bei Enrico Fermi zu lernen. Das begann mit der ersten nuklearen Kettenreaktion im Jahre 1942 und währte bis zu seinem Tode im Jahre 1954. Als mich dann Frau Fermi, die damals dem Komitee zur Förderung des Physikstudiums angehörte, bat, den vorliegenden kurzen Band über das Neutron zu schreiben, war es mir eine Freude, diese Aufgabe zu übernehmen, denn ich hoffte, hiermit manchem Menschen jenes Verlangen nach Erkenntnis der Natur weitergeben zu dürfen, das Fermi in so wunderbarer Weise besaß. Das Schreiben erwies sich als ein angenehmes Erlebnis; als ich mein Wissen von den Eigenschaften des Neutrons in Worte faßte, kamen mir dauernd die Erinnerungen an die anregenden Aussprachen mit Fermi, bei denen mir all diese Dinge klargeworden waren.

Dieses Buch handelt von einem Spezialgebiet, das im normalen Unterricht gar nicht berührt wird. Weil das Neutron grundlegende physikalische Gesetze wunderbar zu illustrieren vermag, weil es guten Einblick in den Bau der Atome gewährt, und weil es vielseitige praktische Anwendung findet, erweist es sich als ein für die Naturwissenschaftliche Taschenbuchreihe sehr geeignetes Thema. Ich habe das Buch in einer Weise geschrieben, daß man zu seinem Verständnis nicht auf Schulkenntnisse angewiesen ist. Ich habe es auf drei vollkommen verschiedene Gruppen von Lesern abgestimmt. Da sind zum ersten all die jungen Studenten, die selbst Forschung treiben wollen, zweitens alle Oberschüler, die sich zwar an

der Schule noch mit Naturwissenschaften befassen, die aber auf andere Gebiete abwandern wollen, und drittens alle jene, die sich für die modernen Naturwissenschaften interessieren.

Trotz der zwischen diesen Gruppen zu erwartenden Unterschiede war es glücklicherweise nicht schwer, ein Buch zu schreiben, das alle Leser anzusprechen vermag. Ich hielt es für unnötig, zur Beschreibung der Eigenschaften des Neutrons viel Mathematik oder Fachausdrücke zu verwenden. Auch brauchte die an sich schon hochinteressante subatomare Welt keinerlei sensationelle Aufmachung. »Das Neutron« kann meinem Gefühl nach auch ohne höhere Mathematik und ohne Schlagzeilen die Bedeutung und Harmonie der wissenschaftlichen Tatsachen aufzeigen. Ich bin davon überzeugt, und Sie werden mir sicher darin beipflichten, daß diese Geschichte so viel spannende, tiefe und schöne Elemente enthält, daß ihre Bedeutung denen, die sich wirklich damit befassen wollen, auch ohne besondere Vorkenntnisse klar wird.

Ein solches Buch, so klein es sein mag, erforderte die Zusammenarbeit vieler Leute. Unter diesen möchte ich besonders Frau Laura Fermi danken, die mir Gelegenheit gab, vom Neutron zu erzählen, sowie Herrn Professor S. A. Goudsmit, der mich nach Kräften unterstützte. Frau Jeanne Stough half mir bei der Fertigstellung des Manuskriptes, Georg R. Cox und Robert C. Garth bei der Anfertigung der Zeichnungen. Für die Umwandlung des Manuskriptes in ein richtiges Buch habe ich John H. Durston und Bruce F. Kingsbury vom Physical Science Study Committee, sowie Frau Lee Wertheim besonders zu danken.

DONALD J. HUGHES

INHALTSVERZEICHNIS

Erstes Kapitel

DIE VIELSEITIGKEIT DES NEUTRONS

Wir sind gewohnt, wunderbare und geheimnisvolle Geschichten zu hören – gewöhnlich von fernen Ländern und aus vergangenen Zeiten. Und doch gibt es noch ein anderes wunderbares und geheimnisvolles Reich: das Innere vertrauter Gegenstände – wenn wir nur lernen, sie richtig zu sehen. Betrachten wir sie mit unseren fünf Sinnen, so mögen diese Gegenstände in der Tat prosaisch erscheinen. Mit dem erstaunlichen sechsten Sinn empfindlicher Instrumente aber geht uns innerhalb der Materie eine neue Welt auf, die fast über alles Verstehen wunderbar ist. Und diese Welt des sehr Kleinen ist noch aus einem anderen Grund so fesselnd: Im Gegensatz zu den Märchenreichen existiert sie wirklich. Es ist eine seltsame Welt, dieses Reich subatomarer Wesen, aber doch eine sehr reale Welt. Viel davon wird vielleicht nie erforscht werden können, obgleich sich der Schritt der Forschung täglich beschleunigt. Je mehr unser Wissen über diese Dinge wächst, manchmal langsam und mühselig, manchmal aber sprunghaft, desto mehr neue Hilfsmittel entdecken wir, die unseren Untersuchungen weiterhelfen. Und über ein solches Hilfsmittel wollen wir in diesem Buch berichten. Wie in der Welt des sehr Kleinen nicht anders zu erwarten, ist es ein winziges ungeladenes Materieteilchen.

Es mag seltsam erscheinen, einem einzelnen Teilchen – und noch dazu einem so kleinen – ein ganzes

Buch zu widmen. Wir wollen mit diesem Band ganz einfach Natur und Wirkungen des Neutrons beschreiben. Und doch handelt unsere Geschichte von sehr verwickelten Dingen; um uns durchzuarbeiten, müssen wir uns mit einigen der ehrfurchterregendsten Geheimnisse des Universums wenigstens etwas beschäftigen und eine der erstaunlichsten wissenschaftlichen Errungenschaften des Menschen studieren. Bevor wir aber mit unserer Geschichte beginnen, wollen wir uns darüber klarwerden, warum wohl inmitten einer so großartigen Umgebung gerade das unscheinbare Neutron soviel Aufmerksamkeit verdient.

Seit Generationen streben Chemiker, Physiker und Mathematiker nach Erkenntnissen über die atomistische Struktur der Materie. Und doch hatte vor knapp dreißig Jahren das Neutron in ihrer Gedankenwelt noch keinen Platz, denn es war unbekannt. In der heutigen Physik ist dieses Teilchen aber so wichtig, daß sich ein ganzer Forschungszweig – die Neutronenphysik – auf seinen Eigenschaften aufbaut. Und dieser neue Zweig der Wissenschaft, so jung er sein mag, berührt so viele Gebiete der reinen Forschung und erfährt so viel praktische Anwendung, daß er mehr darstellt als nur ein einzelnes Arbeitsgebiet. Wir brauchen, um uns von der Nützlichkeit des Neutrons beeindrucken zu lassen, nur an die Stromerzeugung in atomaren Großkraftwerken zu denken oder an den Antrieb riesiger, schneller Unterseeboote. Neben diesen hochinteressanten Anwendungsgebieten übernimmt aber das Neutron auch wichtige Rollen im Reich der »reinen« oder »Grundlagen«-Forschung, die nicht auf praktische Anwendung hinzielt. Auf diesem Gebiet fällt die

Wirkung des Neutrons bei weitem nicht so sehr ins Auge wie bei der Atomenergie, wird sich aber auf weite Sicht noch segensreicher auswirken.

Wie ist es möglich, daß dieses Materiebröselchen in den letzten dreißig Jahren eine derartige Vielseitigkeit beweisen konnte?

Ein anderes, ganz ähnliches Teilchen, das *Proton*, hat kein derartiges Kunststück vollbracht und ist doch schon viel länger bekannt. Es gibt keine »Protonenphysik«, obgleich man die grundlegenden Eigenschaften des Protons seit langer Zeit kennt.

Strukturmäßig sind sich Proton und Neutron ganz ähnlich. Sie unterscheiden sich hauptsächlich dadurch, daß das Proton eine positive elektrische Ladung trägt, das Neutron aber, wie sein Name andeutet, elektrisch neutral ist. Und doch beruht gerade auf diesem scheinbar trivialen Unterschied – dem Fehlen einer elektrischen Ladung – die erstaunliche Mannigfaltigkeit der Neutronenphysik. Wir werden im Verlauf unseres Berichtes einige der vielen faszinierenden Methoden kennenlernen, nach denen man Neutronen als empfindliche Instrumente für ganz grundlegende Untersuchungen verwenden und auch praktisch anwenden kann. Zuerst wollen wir aber klären, wieso das Fehlen der elektrischen Ladung für die besondere Wirkung des Neutrons von so grundlegender Bedeutung ist.

Die Neutralität des Neutrons ist deshalb so wichtig, weil praktisch alle anderen Bestandteile der Materie elektrisch geladen sind. Protonen sind positiv, die meisten Elektronen negativ; Atome, wenn auch als Ganzes neutral, bestehen aus positiven Kernen, die von Elektronen umgeben sind. Wie wir wissen, üben elektrische Ladungen starke Kräfte auf-

einander aus, ziehen sich an, wenn die Ladungen verschieden, stoßen sich ab, wenn sie gleich sind. Um uns das Grundproblem klarzumachen, wollen wir uns vorstellen, wir versuchten, an einem Stück Materie seine innere Struktur, seine Atome zu untersuchen oder zu verändern, indem wir sie mit schnellen atomaren Teilchen beschießen. Wählten wir als atomare Geschosse geladene Teilchen – etwa Protonen –, so sähen wir uns vor große Schwierigkeiten gestellt. Schießen wir zum Beispiel ein Proton in

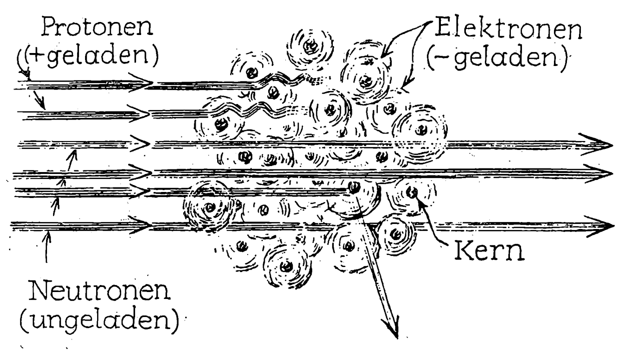


Abb. 1. Das Durchdringungsvermögen des Neutrons ist weitaus größer als das des Protons. Die Anziehungskraft der negativ geladenen Elektronen des Atoms stoppt die positiv geladenen Protonen schnell. Die ungeladenen Neutronen durchdringen die Materie ungehindert, wenn man von den seltenen Zusammenstößen mit Atomkernen absieht.
Wie alle Abbildungen dieses Buches, gilt auch die obige nur als symbolische Darstellung, nicht als naturgetreues Bild von dem, was wir von den Bestandteilen der Materie wissen. Wir können subatomare Teilchen nicht „richtig“ zeichnen. Sie besitzen Eigenschaften, die jenseits unseres Vorstellungsvermögens liegen. Wir müssen daher zu Modellen oder Symbolen greifen, wenn wir einen gewissen Eindruck von den Erfahrungen wiedergeben wollen, welche Wissenschaftler aus indirekten Beweisen und theoretischen Berechnungen gewinnen.

einen Stoff, so bremsen die zwischen seiner Ladung und den negativen Elektronen der Atome wirkenden elektrischen Kräfte das Proton schnell bis zum Stillstand ab. Könnten wir etwas so Kleines wie Atome und ihre Elektronen erkennen, so sähe ein kleiner Ausschnitt unserer Probe etwa so aus, wie es Abbildung 1 zeigt. Da die elektrische Wechselwirkung die Energie des Protons schnell vermindert, braucht man eine hohe Anfangsgeschwindigkeit, falls man zur Untersuchung der Materie überhaupt Protonen verwenden will.

Die elektrisch ungeladenen Neutronen aber dringen leicht und von der elektrischen Ladung der Elektronen ungehindert in das Material ein. Wie wir in Abbildung 1 sehen, kümmern sich Neutronen überhaupt nicht um die Atome, sondern laufen, wenn sie nicht zufällig einmal direkt auf einen Atomkern treffen, auf geradlinigen Bahnen. Das Neutron benötigt keine hohe Geschwindigkeit, um Materie zu durchdringen, ja es kann sogar ganz langsam sein. Wie wir später sehen werden, ändern sich, wie bei allen Teilchen, so auch beim Neutron die Eigenschaften mit der Geschwindigkeit sehr stark. Um mit Neutronen in Forschung oder Technik bestimmte Aufgaben erfüllen zu können, ist es daher wichtig, Neutronen mit der für jede Aufgabe günstigsten Geschwindigkeit zur Verfügung zu haben. Weil aber *alle* Neutronen unabhängig von ihrer Geschwindigkeit frei in Materie eindringen können, steht der gesamte Geschwindigkeitsbereich zur Verfügung, und man kann die für den betreffenden Zweck beste Geschwindigkeit wählen. Unser Bericht wird erläutern, wieso gerade das Fehlen der elektrischen Ladung dem Neutron in der kurzen Zeit, die es dem Menschen

bekannt ist, auf allen Gebieten der reinen und angewandten Naturwissenschaft eine derartige Bedeutung verlieh.

Es ist vielleicht angebracht, an dieser Stelle die »Taten« des Neutrons in seiner »Lebenszeit« von weniger als dreißig Jahren kurz zu skizzieren und die eindrucksvollsten später ausführlich zu behandeln. Da die Umstände seiner »Geburt« – das heißt, seiner Entdeckung – besonders spannend und geheimnisvoll sind, wollen wir das ganze nächste Kapitel dieser faszinierenden Geschichte widmen und hier nur feststellen, daß das Neutron, erst 1932 geboren, jetzt ins beste Mannesalter kommt.

Es brauchte aber keineswegs lange, um seine Fähigkeiten zu zeigen, denn schon 1939, im Alter von sieben Jahren, half es mit bei dem Nachweis, daß Uran sich spalten läßt. Dabei zeigte sich zum erstenmal greifbar die Möglichkeit, Materie in nennenswerten Mengen zu zerstören und in Energie umzuwandeln. Der Betrag dieser Energie, schon lange zuvor in Einsteins Gleichung $E = mc^2$ vorhergesagt, erwies sich als ungeheuer groß, und diese Entdeckung leitete das Zeitalter eines wichtigen neuen Brennstoffes ein – der Masse selbst. Und im Jahre 1942, im zarten Alter von zehn Jahren, beteiligte sich das Neutron an der kontrollierten Kettenreaktion, mit deren Hilfe erfolgreich und in praktisch verwertbaren Mengen Energie aus Masse freigemacht wurde.

Nur drei Jahre später wurde diese Kettenreaktion zwischen Neutronen und Uran dazu verwendet, eine Atombombe zu bauen. Bald darauf kam das Ende des zweiten Weltkriegs. Für das Neutron begann die Zeit, wo es auch auf nicht-militärischem Gebiet seine Fähigkeiten zeigen konnte. Auf immer weitere, für

die friedliche Anwendung der Atomenergie innerhalb weniger Jahre eine international organisierte Angelegenheit wurde. Gerade einundzwanzig Jahre war das Neutron alt, als Präsident Eisenhower in einer Ansprache vor der Generalversammlung der Vereinten Nationen im Dezember 1953 vorschlug, es solle eine internationale Behörde zur Beschleunigung der segensreichen Anwendung der Atomenergie eingerichtet werden. Zwei Jahre später fand in Genf die erste weltweite Konferenz über die friedliche Anwendung der Atomenergie statt. Die Reichhaltigkeit des auf dieser »Atomkonferenz« veröffentlichten technischen Materials lieferte einen endgültigen Beweis dafür, welchen wichtigen Platz das damals dreiundzwanzig Jahre alte Neutron auf dem Gebiet der praktischen Anwendungen errungen hatte. Im sechsundzwanzigsten Lebensjahr des Neutrons fand dann die zweite Genfer Konferenz statt, die einen bedeutend größeren Rahmen als die erste hatte. Und die Internationale Atomenergiebehörde wurde zur festen Einrichtung, mit Sitz in Wien und mit über achtzig Mitgliednationen.

So wichtig diese praktischen Anwendungsgebiete sein mögen – Elektrizitätserzeugung, Antriebskraft für Schiffe und Radioisotope für medizinische und industrielle Verwendung –, so wollen wir doch in erster Linie das Wirken des Neutrons auf dem Gebiet der reinen Forschung betrachten. Das läßt sich zwar nur viel schwieriger beschreiben und ist viel subtiler als etwas so Plumpes wie Atom-U-Boote, ist aber in jeder Hinsicht ebenso interessant. Wir haben es in der Grundlagenforschung mit Gesetzen zu tun, die

für *alles* grundlegend sind, für die kleine Welt der Atome ebenso wie für die astronomischen Ausmaße der Spiralnebel. Als einer der grundlegenden Bausteine der Materie ist das Neutron für das Auffinden und Verstehen dieser Grundgesetze besonders wichtig. Schon die Eigenschaften des Neutrons, als einzelnes Teilchen betrachtet, liefern eingehende Informationen über die innerste Struktur der Materie; als noch fruchtbarer erweist es sich aber, das Neutron mit anderen Teilchen und mit festen Körpern zusammentreffen zu lassen. Dabei offenbart sich in präzisen Experimenten, welche Beziehungen zwischen den Elementarteilchen Grundlagen für die Struktur der Welt sind. Wir wollen die gewaltige Bedeutung dieses Teilchens vor Augen behalten, wenn wir uns als erstes dem Rätsel zuwenden, das die Entdeckung des Neutrons einleitete. Dann wollen wir uns mit den faszinierenden Eigenschaften des Neutrons selbst beschäftigen und sein vielseitiges Verhalten gegenüber allen Formen der Materie betrachten.

Zweites Kapitel

RÄTSEL UND LÖSUNGEN

Zum erstenmal demonstrierte das Neutron seine Bedeutung für die moderne Physik unmittelbar nach seiner Entdeckung: Mit seiner Hilfe offenbarte sich nämlich die Bauweise des Atomkerns, der selbst erst seit achtzehn Jahren bekannt war. Bevor wir aber die Geschichte der Entdeckung des Neutrons und seiner Einordnung in den Atomkern erzählen, müssen wir einige einfache Eigenschaften des Atoms kennenlernen, besonders seines innersten Teiles, des Kerns. Dadurch werden wir die fundamentale Bedeutung des Neutrons viel besser verstehen und können ermessen, auf welch dramatische Weise die Fortschritte in der Wissenschaft geschehen. Andererseits dürfen wir aber nicht übersehen, daß die Entdeckung des Neutrons, so plötzlich und aufregend sie vor sich ging, nur auf Grund zahlreicher früherer, sorgfältiger Untersuchungen erfolgen konnte; erst diese zusammen machten den endgültigen Durchbruch möglich.

DAS ATOM UND SEIN KERN

Während des achtzehnten und neunzehnten Jahrhunderts hatten Chemiker mühsam Beweise dafür gesammelt, daß alle Materie aus sehr kleinen, *Atome* genannten Teilchen zusammengesetzt ist, die zu winzig sind, als daß man sie selbst mit den stärksten Mikroskopen sehen könnte. Aus der Beobachtung, wie die verschiedenen Stoffe miteinander reagieren, konnten sie die relativen Gewichte und Größen dieser

unsichtbaren Teilchen genau bestimmen und manches darüber erfahren, wie sich die verschiedenartigen Atome zu der Vielzahl der Stoffe verbinden, aus denen die Welt besteht. So erkannte man die Einfachheit der *Elemente*, wie Wasserstoff, Sauerstoff, Eisen, Kupfer und so weiter; jedes dieser Elemente besteht nur aus einer Sorte von Atomen; andere Stoffe, die wir *Verbindungen* nennen, enthalten mehrere Arten von Atomen, wie wir in Abbildung 2 sehen.

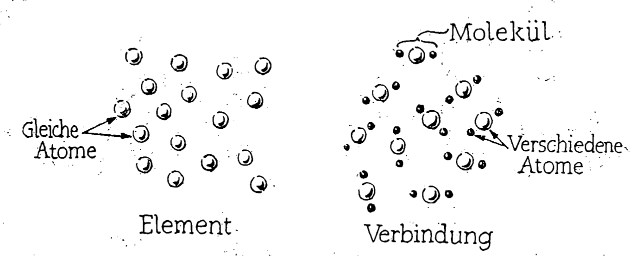


Abb. 2. Die Mannigfaltigkeit der Natur ist dadurch möglich, daß sich die Elemente zu Verbindungen zusammenschließen. Elemente bestehen aus einer einzigen Sorte von Atomen; Verbindungen bestehen aus Molekülen, die viele Sorten von Atomen enthalten. Dieses Diagramm soll die Beziehung von Atomen zu Elementen und von Molekülen zu Verbindungen verdeutlichen. Es gibt nur 92 natürlich vorkommende Elemente; sie verbinden sich aber auf zahllose Weisen und bauen so die uns vertraute Welt auf.

Wenn sich ein Atom mit anderen Atomen verbindet, bleibt es grundsätzlich unverändert, obgleich sich die mit unseren Sinnen wahrnehmbaren Eigenschaften wesentlich ändern. So bilden zum Beispiel dieselben Sauerstoffatome, die in Verbindung mit Wasserstoffatomen das Wasser aufbauen, das Gas Sauerstoff in der Atmosphäre. Lange bevor man die innere Struktur der Atome untersuchte, wußten die Chemiker

schon viel über die Elemente, unter denen das Gas Wasserstoff die leichtesten Atome hat, das Metall Uran die schwersten.

Eine Vielzahl von Versuchen hat schrittweise den Aufbau der Atome enthüllt. Den größten Teil des Atomvolumens nehmen die Bahnen der sich schnell bewegenden Elektronen ein, von denen jedes eine negative elektrische Ladung trägt. Das Wasserstoffatom enthält nur ein Elektron, Uran hat 92. Da die Elektronen äußerst leicht sind, ist praktisch das ganze Atomgewicht auf ein kleines zentrales Stückchen Materie, den *Kern*, konzentriert. Chemische Experimente liefern genaue Angaben über das Gewicht der Atome sowie über die Art und Weise, in der sie sich mit Hilfe ihrer am weitesten außen sitzenden Elektronen miteinander verbinden. All diese Versuche sagten aber fast nichts über den Kern aus. Chemische Umsetzungen, wie etwa Verbrennen, beeinflussen nur die Elektronen auf den äußersten Schalen; der Kern, der tief unter den Elektronen sitzt, bleibt völlig unverändert.

Es ist sogar möglich, aus dem chemischen Verhalten die Elektronenzahl in den Atomen jedes Elementes abzuleiten. So hat der russische Chemiker Mendelejew alle Elemente in eine bestimmte chemische Ordnungsreihe eingefügt, die vom Wasserstoff bis zum Uran reicht. Obgleich Mendelejew noch nicht mit dem Begriff »Elektron« operierte – das Elektron war ja noch nicht entdeckt –, entsprach seine Einordnung der Elemente doch genau der Anzahl der Elektronen, von der Zahl eins für Wasserstoff bis zur Zahl 92 für Uran. Später konnte man dann die Richtigkeit seiner chemischen Ordnungsreihe mit Hilfe von Röntgenstrahlen bestätigen; aus der Wechselwirkung von

Röntgenstrahlen mit einem Atom läßt sich nämlich die Anzahl seiner Elektronen direkt bestimmen. Wieder ergab sich dieselbe Ordnungsreihe für die Elemente – ein Elektron bei Wasserstoff, zwei bei Helium und so weiter bis zu 92 bei Uran.

Da Atome nach außen hin normalerweise keine elektrische Ladung besitzen, muß offensichtlich jedes Atom irgendwo einen genügenden Betrag positiver Elektrizität aufweisen, der die negative Ladung der Elektronen kompensiert. Überdies muß der Träger dieser positiven Ladung auch noch den größten Teil der Masse des Atoms in sich vereinen, da ja die Elektronen äußerst leicht sind. Wo aber die positive Ladung und die Masse innerhalb des Atoms lokalisiert ist, konnten chemische Experimente nicht nachweisen.

Im Jahre 1914 entdeckte der britische Physiker Ernest Rutherford, daß Masse und positive Ladung im Mittelpunkt des Atoms konzentriert sind. Bei seinem Versuch, der die Kernphysik einleitete, schoß er *Alpha-Teilchen,* die von Radium ausgesandt werden, durch dünne Metallfolien. Dabei gingen die Alphateilchen gewöhnlich durch die Folie hindurch und wurden nur leicht gestreut. In seltenen Einzelfällen aber geschah es, daß sie weit abgelenkt oder gar, ohne überhaupt durch die Folie zu kommen, nach rückwärts gestreut wurden. Rutherford schloß daraus, daß an dieser weiten Ablenkung (siehe Abb. 3) nur ein kleines elektrisch geladenes Teilchen innerhalb der Atome schuld sein konnte, denn eine diffuse Ladungsverteilung innerhalb der Materie kann Alphateilchen keinesfalls unter großen Winkeln streuen. Wenn aber die Ladung praktisch in einem einzigen Punkt lokalisiert ist, muß das Alphateilchen einen starken elektrischen Rückstoß erfahren, falls es zu-

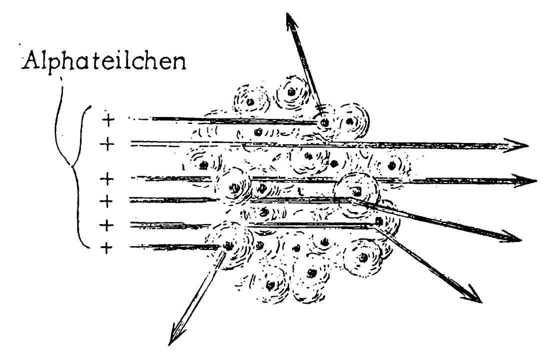


Abb. 3. Die Ablenkung von Alpha-Teilchen führte Lord Rutherford zu seiner Entdeckung des Atomkerns. Damit kam die Erforschung der Materie einen großen Schritt voran. Rutherford erkannte, daß sich die gelegentliche starke Ablenkung der Teilchen nur erklären ließ, wenn die positive Ladung des Atoms in einem einzigen Punkt im Zentrum des Atoms vereinigt ist – eben im Kern.

fällig einmal direkt auf diesen Punkt zufliegt. Und in der Tat ist der Kern im Vergleich zum Atom wirklich nur ein Punkt, denn er ist mit seinem Durchmesser von 10^{-12} cm etwa zehntausendmal kleiner als das Atom mit 10^{-8} cm.

DAS RÄTSEL VOM AUFBAU DES KERNS

Die Existenz des Kerns war nun nachgewiesen; zu lösen blieb das Rätsel, wie er aufgebaut ist. Die Vorstellung der Physiker vom Kern des einfachsten Atoms, des Wasserstoffs, erschien durchaus plausibel; bei allen schwereren Atomen jedoch trat eine grundsätzliche Schwierigkeit auf. Das Wasserstoffatom ist das leichteste von allen, und man nimmt seine Masse als Einheit – genauer gesagt: seine Massenzahl ist

eins. Sein besonders einfacher Kern führt den besonderen Namen *Proton*. Das Proton konnte nur eine einzige positive Ladung besitzen, denn es war genau bekannt, daß das Wasserstoffatom nur ein Elektron enthält.

Der Ärger begann gleich beim nächstschweren Atom, dem Helium. Man wußte, daß es zwei Elektronen enthält. Wäre sein Gewicht doppelt so groß wie das von Wasserstoff, so hätte es keinerlei Schwierigkeiten gegeben, denn in diesem Fall bestünde sein Kern offensichtlich aus zwei Protonen. Aber anstatt zweimal so schwer, ist das Helium viermal so schwer wie Wasserstoff. Es hat die Massenzahl vier, obwohl nur zwei Kernladungen nötig sind, um seine beiden Elektronen zu neutralisieren.

Wie Abbildung 4 zeigt, wird das Problem bei schwereren Atomen keineswegs einfacher. Ihre Kerne sind, wie auch beim Helium, etwa doppelt so schwer, wie es der zur Neutralisierung der Elektronenladung erforderlichen Protonenzahl entspricht. Bei ganz schweren Kernen wird es sogar noch schlimmer: Das Gewicht des Urans zum Beispiel ist etwa zweieinhalbmal so groß wie das von 92 Protonen – diese Zahl entspricht der Anzahl seiner Elektronen. Es gibt sogar Fälle, wo verschiedene Atome *desselben* Elements verschieden schwer sind. So sind U^{235} und U^{238} chemisch gleich, beide sind Uran und enthalten 92 Elektronen, aber ihre Massenzahlen differieren um drei Einheiten, 235 und 238. Wenn Kerne nur aus Protonen bestünden, wären diese *Isotope* nicht zu erklären.

Man versuchte, diese ständig auftauchenden Diskrepanzen durch die Annahme von Elektronen im

1 Elektron

Masse: 1
Ladung: 1
WASSERSTOFF

2 Elektronen

Masse: 4
Ladung: 2
HELIUM

3 Elektronen

Masse: 7
Ladung: 3
LITHIUM

92 Elektronen

Masse: 238
Ladung: 92
URAN

Abb. 4. Masse und Ladung – d. h. die Anzahl der Kernteilchen und die Anzahl der Protonen – sind nur im Wasserstoffatom gleich. Dieses enthält nur ein Proton und ein Elektron, aber kein Neutron. Alle anderen Elemente, besonders die schweren Atome, besitzen mehr Masse als Ladungen. Diese Abbildung gibt einen gewissen Eindruck davon, wie stark sich die verschiedenen Elemente in Masse, Ladung und Elektronenzahl unterscheiden.

kompensierten die positive Ladung von Protonen und machten es somit möglich, das Gewicht des Kerns ohne Vergrößerung seiner Nettoladung zu erhöhen. Anfangs schien diese Annahme auch durchaus einleuchtend, denn damit konnte man nicht nur das überschüssige Gewicht, sondern auch die Existenz der Isotope erklären. Als aber die fundamentalen Eigenschaften von Protonen und Elektronen besser bekannt wurden, stellte man fest, daß sich Elektronen unmöglich im winzigen Atomkern aufhalten können. Der Grund hierfür läßt sich recht leicht angeben:

Elektronen sind ganz einfach zu groß, um in den Kern zu passen. Die volle Bedeutung dieser Aussage ist allerdings viel schwerer zu verstehen. Wir werden uns im nächsten Kapitel vom Neutron zeigen lassen, daß jedes *Teilchen* auch *Welleneigenschaften* besitzt; das bedeutet, daß jedes Teilchen sich auch wie eine Welle verhält und eine Wellenlänge besitzt, die von der Geschwindigkeit abhängt, wobei hohe Geschwindigkeit einer kurzen Wellenlänge entspricht. Befände sich ein Elektron »innerhalb« des Kerns, müßte seine Wellenlänge kleiner als die Größe des Kerns, also seine Geschwindigkeit sehr hoch sein. Zum Unglück für diese Theorie ist die erforderliche Energie des Elektrons *zu* groß; sie entspräche einem Potential von einer Milliarde Volt. Da Energien solcher Größe innerhalb des Kerns nicht vorhanden sind, widerlegt diese fundamentale Überlegung die Hypothese, es könnten im Kern Elektronen eingebaut sein.

DIE ENTDECKUNG DES NEUTRONS

Gerade als die Theorie des Kernaufbaus in eine Sackgasse geraten zu sein schien, fanden Versuche statt, die an sich gar nichts mit diesem Problem zu tun hatten und die doch zu seiner Lösung führen sollten. Es waren dies Versuche, bei denen durch Beschuß mit Alphastrahlen (Heliumkernen) Atome eines Elements in die eines anderen umgewandelt wurden. Schnelle Alphateilchen standen zur Verfügung, da sie von Radium und anderen schweren Kernen spontan emittiert werden. Die erste derartige Umwandlung mit Alphateilchen als Geschoß vollbrachte Rutherford im Jahre 1918, als es ihm gelang, ein paar Stickstoffatome in Sauerstoff umzuwandeln. Durch

Absorption des Alphateilchens verwandelte sich der Stickstoff in Fluor, das wiederum durch Emission eines Protons zu Sauerstoff wurde.

1930 führte man diese Atomumwandlungen in den verschiedensten Laboratorien fort; uns interessieren hier besonders die Arbeiten von Bothe und Becker in Deutschland. Wenn sie bei ihren Versuchen Alphateilchen auf das Metall Beryllium schossen, entstand eine sehr durchdringende Strahlung, eine Strahlung, die mit Leichtigkeit Bleiplatten von mehreren Zentimetern Dicke durchdrang. Das war nun wirklich ein unerwartetes Ergebnis, denn die bei den gewöhnlichen Umwandlungen entstehenden Protonen lassen sich durch ganz dünne Bleifolien abbremsen. Die durchdringendsten zu dieser Zeit bekannten Strahlen waren die Gamma-Strahlen, die das Radium aussendet und die zum Beispiel zur Vernichtung von Krebszellen innerhalb des menschlichen Körpers verwendet werden. Da sich aber die neuentdeckte Strahlung als noch durchdringender erwies als die stärksten bisher bekannten Gamma-Strahlen, erschien es ganz unwahrscheinlich, daß auch sie Gamma-Strahlung sein sollte.

Diese mysteriösen Strahlen wurden mit Hilfe einer gasgefüllten Ionisationskammer entdeckt – siehe Abbildung 5 –, in der die Elektrizitätsmenge gemessen wird, die vorüberfliegende Teilchen den Gasatomen durch Ionisation entreißen. In den Weg der Strahlung gestellte Bleiblöcke ließen ihr großes Durchdringungsvermögen erkennen. Dann entdeckte man etwas Weiteres, noch Erstaunlicheres: Dünne Schichten aus Stoffen, die Wasserstoff enthalten – zum Beispiel Paraffin –, ließen die von der Ionisationskammer gemessene Intensität *zunehmen* anstatt abnehmen. Es war klar, daß durch die geheimnisvolle Strahlung

Protonen aus den Wasserstoffatomen herausgeschlagen und mit großer Geschwindigkeit in die Ionisationskammer gestoßen wurden. Um Gamma-Strahlen konnte es sich somit also auf keinen Fall handeln,

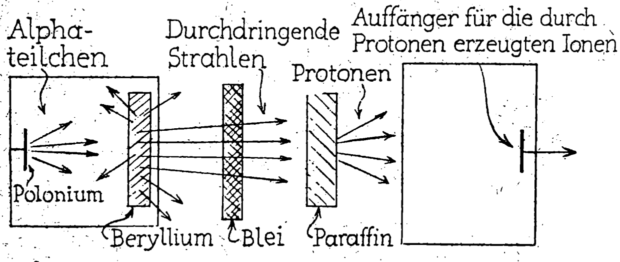


Abb. 5. Bothe und Becker entdeckten eine neue Art durchdringender Strahlen. Mit Alphateilchen beschossenes Beryllium emittiert eine Strahlung, die mit Leichtigkeit Blei durchdringt und aus Substanzen, welche Wasserstoff enthalten, schnelle Protonen herausschleudert.

denn diese brauchen extrem hohe Energien, in der Größenordnung von fünfzig Millionen Volt, um Protonen von der beobachteten hohen Geschwindigkeit aus dem Paraffin zu emittieren.

Der britische Physiker James Chadwick löste das Rätsel. Es sei am wahrscheinlichsten, so führte er aus, daß die Protonen durch Stöße von Teilchen, mit etwa der gleichen Masse wie die Protonen selbst, in Bewegung gesetzt würden. Es gibt ein wohlbekanntes Prinzip der einfachen Mechanik, daß beim Stoß am meisten Energie übertragen wird, wenn beide am Stoß beteiligten Körper die gleiche Masse haben, wie etwa zwei Billardbälle. Wenn also die geheimnisvolle Strahlung aus derartigen Teilchen bestand, mußte sie gar nicht notwendigerweise extrem hohe Energie be-

sitzen. Wenn dieses Teilchen außerdem ungeladen war, so war auch sein großes Durchdringungsvermögen erklärt: Die elektrischen Felder der Atome können dann keinen Einfluß auf seine Bewegung haben. Chadwick maß die Geschwindigkeit der aus verschiedenen Stoffen emittierten Protonen, wandte auf die Meßergebnisse die einfache Stoßtheorie an und konnte daraus die Masse des neuen Teilchens bestimmen und zeigen, daß sie nahezu gleich der Protonenmasse war.

Die Gedankengänge, die zur Bestimmung der Neutronenmasse führten, sind erstaunlich einfach, und wir können aus ihrer Betrachtung manches lernen. Wenn ein Neutron auf einen ruhenden Kern stößt und ihm einen Impuls mitteilt, so befolgt dieser Stoß die gleichen einfachen Gesetze wie aufeinanderprallende Billardbälle. Eines dieser Gesetze lautet, daß bei zentralem Stoß die dem getroffenen Körper mitgeteilte Geschwindigkeit umgekehrt proportional ist zur Summe der Massen von stoßendem und gestoßenem Teilchen. Chadwick verwandte eine dünne Schicht, die Stickstoff enthielt, und fand heraus, daß die Geschwindigkeit der Stickstoffkerne (mit Masse 14) nur ein Siebtel der Geschwindigkeit beträgt, mit der Protonen (von Masse 1) aus Wasserstoff ausgestoßen werden. Aus diesem Verhältnis von eins zu sieben läßt sich die Neutronenmasse M auf Grund der umgekehrten Proportionalität leicht nach der einfachen Gleichung

$$\frac{M + 14}{M + 1} = \frac{7}{1}$$

bestimmen. Ihre Lösung ist einfach

$$M = 1{,}16$$

und bedeutet, daß die Masse des Neutrons ungefähr 16 Prozent größer als die Masse des Protons ist. Spätere und genauere Messungen zeigten, daß in Wahrheit die Masse des Neutrons der des Protons fast gleichkommt und sie nur um etwa 1 Promille übertrifft. Wie wir später sehen werden, ist dieser winzige Überschuß von großer Bedeutung.

Nachdem Chadwick die Existenz des neuen Teilchens nachgewiesen und seine Masse bestimmt hatte, taufte er es *Neutron.* Der Name war nicht eigentlich neu; seit Jahren hatten Wissenschaftler Spekulationen über die Existenzmöglichkeit eines ungeladenen Teilchens mit etwa Protonenmasse angestellt. Am verlockendsten war der Gedanke erschienen, daß sich vielleicht ein Elektron mit einem Proton zu einem stabilen, neutralen Gebilde vereinigen könnte – einem Gebilde von der Art eines komprimierten Wasserstoffatoms. Dieses rein fiktive System hatte man schon Jahre vor Chadwicks Entdeckung das »Neutron« genannt. Wir wissen aber mit Sicherheit, daß das Neutron *keine* Kombination von Proton und Elektron ist; die Größe des Elektrons schließt dies vollkommen aus. Wie wir gleich sehen werden, ist das Neutron wirklich ein Elementarteilchen, das vollkommen für sich selbst besteht und einen Grundbaustein der Materie darstellt.

DAS NEUTRON UND DIE BAUWEISE DES KERNS

Nachdem einmal die Existenz und die Masse des Neutrons festgestellt waren, lieferte es sofort eine Lösung für das schwierige Rätsel, wie denn der Kern gebaut ist. Alle Schwierigkeiten mit dem überschüssigen Gewicht der Kerne ließen sich durch die einfache

Annahme beseitigen, daß diese Kerne eine entsprechende Zahl von Neutronen enthalten. So hat Helium offensichtlich zwei Protonen und zwei Neutronen in seinem Kern; dieser wiederum ist von zwei Elektronen umgeben. Damit ergibt sich für das Helium die Massenzahl vier, aber eine Kernladung von nur zwei. Ähnlich muß der Sauerstoff mit einer Massenzahl von sechzehn, aber einer Kernladung von nur acht Einheiten, einen von acht Elektronen umgebenen Kern aus acht Protonen und acht Neutronen besitzen. Auch stellt die »Größe« des Neutrons kein Problem dar, denn seine im Verhältnis zum Elektron große Masse bedeutet eine viel kleinere Wellenlänge, weswegen es sich mit Leichtigkeit in den Kern einfügen läßt. Der Aufbau von einigen der leichteren Kerne aus Neutronen und Protonen ist aus Abb. 6 ersichtlich.

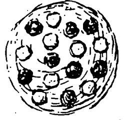
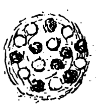
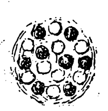



Abb. 6. Hier sind Bestandteile des Kerns einiger leichter Atome gezeigt. Die Zahl der jeden Kern umgebenden Elektronen (in der Zeichnung weggelassen) ist gleich der Kernladung, so daß ein normales Atom die Gesamtladung Null besitzt.

Für ein weiteres Rätsel der Kernbauweise – das der *Isotope* – fand sich ebenfalls eine einfache Erklärung. Seit einiger Zeit war bekannt, daß Atome ein und desselben Elementes nicht alle gleich viel wiegen, obgleich sie gleiche chemische Eigenschaften besitzen. Man konnte sogar mit ausgeklügelten elektrischen

und mechanischen Methoden die Atome eines bestimmten Stoffes in Gruppen von verschiedenen Atomgewichten trennen. So ließ sich Chlor in zwei verschiedene Arten von Atomen oder Isotope aufteilen, die einen mit der Masse 35, die anderen mit der Masse 37. Beim Uran, das hauptsächlich Atome von der Masse 238 besitzt, fand man auch Atome mit der Masse 235. Diese verschiedenen Arten – oder *Isotope* – von Atomen desselben Elementes ließen sich ohne das Neutron nur schwer, mit ihm aber ganz leicht erklären. Alle Uran-Isotope müssen offenbar im Kern dieselbe Zahl von 92 Protonen enthalten, denn alle Uran-Atome enthalten 92 Elektronen. Die schwereren Isotope besitzen ganz einfach mehr Neutronen, 146 bei U^{238} gegenüber 143 bei U^{235}. Von fast allen Elementen gibt es mehrere Isotope; die des Sauerstoffes zeigt Abbildung 7.





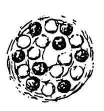


Abb. 7. Die Isotope des Sauerstoffs – jedes ohne seine Elektronen gezeichnet – differieren zwar in ihrer Masse, haben aber gleiche chemische Eigenschaften. Jedes besitzt dieselbe Anzahl Protonen.

Weiterhin war bekannt, daß Isotope, die vom Standardtypus der betreffenden Atomsorte gewichtsmäßig stark abweichen, oft instabil sind und sich unter Aussendung von durchdringenden Strahlen, wie

Elektronen- oder Gamma-Strahlen, in stabile Formen umwandeln. Diese *Radioisotope* ließen sich nun leicht erklären. Man erkannte sie als Isotope mit ungewöhnlich hoher oder ungewöhnlich niederer Neutronenzahl. Die Zahl der Neutronen muß der Anzahl der Protonen in bestimmter Weise entsprechen, wenn der Kern besonders stabil sein soll. Die häufigste und stabilste Form eines bestimmten Elementes enthält ungefähr diese Protonenzahl. Ist die Zahl der Elektronen viel größer oder viel kleiner als dieser »Idealwert«, so ist der Kern instabil, das heißt, er ist ein Radioisotop. Im nächsten Kapitel werden wir erfahren, daß diese Radioisotope in Naturwissenschaften, Medizin und Technik im Laufe der letzten Jahre zu enormer Bedeutung kamen, weil man sie in Kernreaktoren leicht und in großer Menge herstellen kann. Man erzeugt Radioisotope dadurch, daß man bei stabilen Elementen die Neutronenzahl erhöht, auf diese Weise das Verhältnis von Neutronen zu Protonen ändert und damit die Elemente instabil macht.

In diesem Kapitel haben wir gesehen, wie mit Hilfe des neuentdeckten Neutrons die lange ungelösten Probleme von der Existenz der Isotope und vom Aufbau der Kerne gelöst wurden. Schon bei Beginn seiner Karriere ließ dieses winzige Teilchen erkennen, daß es sich auf zweierlei Art und Weise unentbehrlich erweisen würde: zum ersten als vielseitiges Instrument der reinen Wissenschaft und damit als unschätzbare Hilfe zum Verständnis der Struktur der Materie, zum zweiten als Quelle unzähliger praktischer Anwendungen, von denen die Erzeugung von Radioisotopen nur die erste war. In den folgenden Kapiteln werden wir noch mehr davon erfahren, wie sich dieses erste Versprechen des Neutrons erfüllte.

Drittes Kapitel

WELLEN UND TEILCHEN

Wenn auch das Neutron bei seiner Entdeckung ganz schlicht und einfach zu sein schien, wissen wir heute der Tat zeigt es eine derartige Vielfalt an Erscheidoch, daß es ein kompliziertes Gebilde darstellt. In nungsformen, daß es uns verwirren würde, wollten wir sie alle gleichzeitig betrachten. Einige seiner wichtigsten Eigenschaften sind natürlich schon seit seiner Entdeckung bekannt. Es war ja schließlich gerade die Tatsache, daß es eine ebenso große Masse wie das Proton, aber keine elektrische Ladung hat, was Chadwick auf den Gedanken brachte, ein neues Teilchen entdeckt zu haben. In diesem Kapitel werden wir einige nicht ganz so sehr ins Auge fallende Eigenschaften kennenlernen – Eigenschaften, die uns verstehen lassen, auf welche Weise sich das Neutron in so kurzer Zeit nützlich machen konnte. Viele seiner anderen hochinteressanten Eigenheiten werden beim Lesen dieses Buches von selbst auftauchen.

Das Verhalten des Neutrons ist durchaus nicht immer vollkommen klar zu erkennen; Grund hierfür sind gewisse Eigenschaften, die allen extrem kleinen Dingen gemeinsam sind. In dieser subatomaren Welt des sehr Kleinen haben die Gesetze der *Quantenmechanik* volle Gültigkeit, und das Verhalten von Elementarteilchen erscheint unserem an das Verhalten großer Objekte der Alltagswelt gewöhnten Verstand höchst fremdartig. Dazu kommt, daß man die seltsamen Verhaltensweisen der winzigen Teilchen innerhalb des Atoms gar nicht direkt beobachten

kann. Sie sind selbst für die stärksten Mikroskope viel zu klein, und deshalb muß man ihr Verhalten nach indirekten Methoden folgern. Die Entdeckung des Neutrons ist dafür ein gutes Beispiel.

Daß solche Beobachtungen nur auf indirektem Weg möglich sind, bedeutet aber keinen wesentlichen Unterschied, denn wir können der Existenz und der Wirkungsweise dieser Teilchen ebenso sicher sein wie der Existenz und Wirkungsweise der großen und vertrauten Objekte, der Züge, Flugzeuge und Schiffe. Diese Indirektheit stellt in der Tat eine Herausforderung dar, uns mit diesen unbekannten und unsichtbaren Objekten, welche der Quantenmechanik gehorchen, näher zu befassen. Dabei werden uns die üblichen Regeln des gesunden Menschenverstandes wenig helfen – sie können uns manchmal sogar hindern. Das Neutron ist ein ausgezeichnetes Demonstrationsbeispiel für die Gesetze der Quantenmechanik, weil es keine elektrische Ladung besitzt. Es ist in der Lage, sich frei durch Materie hindurch zu bewegen, sogar bei sehr kleinen Geschwindigkeiten, die das unserer Alltagserfahrung so fremde quantenmechanische Verhalten besonders deutlich werden lassen. Wenn wir mit diesen langsamen Neutronen, die wir gar nicht sehen, im Laboratorium Experimente anstellen, ihr Verhalten kontrollieren und nachmessen, müssen wir immer in Begriffen der Quantenmechanik denken. Wir dürfen ihr Verhalten nicht für eine schwerverständliche und dunkle Auswirkung irgendwelcher unbekannter Objekte halten; wir wüssen es als normales Verhalten der Neutronen in unserer Meßanordnung akzeptieren. Es ist eben ganz einfach ein Verhalten, das wir in der Ausdrucksweise der uns vertrauten Objekte nicht beschreiben oder verstehen könnten.

Wir wollen uns nun einer der bemerkenswertesten Eigenschaften des Neutrons zuwenden: seiner Doppelnatur als Teilchen *und* als Welle.

TEILCHEN UND WELLEN

Bis zur Entwicklung der Quantenmechanik, die etwa um 1900 begann, glaubte man, *Wellen* seien vernünftige, einfache, und definierte Bewegungen, wie wir sie etwa in der Form von Schall- und Lichtwellen kennen. Man hielt sie für offenbar vollkommen verschieden von den *Teilchen*, wie etwa Elektronen und Protonen, die man sich als kleine Materieklümpchen dachte. Während des neunzehnten Jahrhunderts gab es eine lange Kontroverse, ob das Licht Wellen- oder Teilchennatur besitzt, aber niemand hätte zu dieser Zeit anzudeuten gewagt, daß an beiden Antworten etwas Wahres sein könne. Natürlich können sich Lichtwellen und feste Teilchen manchmal gleichartig verhalten, zum Beispiel wenn sie von einer ebenen Oberfläche reflektiert werden (Abb. 8),

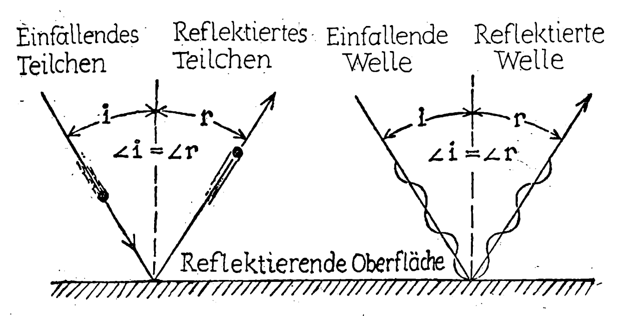


Abb. 8. Sowohl Teilchen als auch Wellen werden an ebenen Oberflächen so reflektiert, daß der Einfallwinkel α (Alpha) gleich dem Ausfallwinkel β (Beta) ist.

aber diese Ähnlichkeiten betrachtete man nicht als grundlegend. Man hielt das Problem für gelöst, als Experimente über die Fortpflanzung von Licht in Wasser »bewiesen«, daß sich Licht wie eine Welle verhält.

Zu Beginn unseres Jahrhunderts aber zeigten einige beunruhigende Experimente, daß Licht tatsächlich einige Eigenschaften aufweist, die man gewöhnlich den Teilchen zuordnet; und um die Verwirrung noch größer zu machen, stellte es sich heraus, daß Teilchen, wie etwa die Elektronen, sich manchmal wie Wellen verhalten. Die Erkenntnis des Dualismus zwischen Welle und Korpuskel bewirkte eine Umwälzung der gesamten Grundlagen des wissenschaftlichen Denkens, und zur Erklärung dieses Dualismus mußte eine neue Theorie, die *Quantenmechanik* (oder *Wellenmechanik*), entwickelt werden. Max Planck erkannte im Jahre 1900 als erster, daß die Ausstrahlung von Wärme oder Licht kein kontinuierlicher Vorgang ist, sondern nur in bestimmten, winzigen Mengen erfolgt. Diese Erkenntnis hatte grundlegende Bedeutung, denn sie ist unvereinbar mit der Auffassung vom Licht als einfacher Wellenbewegung.

Das Wesentliche der neuen Theorie besteht darin, daß eine bestimmte Lichtmenge, die man *Quant* nennt, in vieler Hinsicht sich ähnlich einem Teilchen verhält, und umgekehrt, daß jedes materielle Teilchen gewisse Welleneigenschaften besitzt, so etwa eine bestimmte *Wellenlänge*. Es wird sich also jedes Neutron, das selbstverständlich eine bestimmte Masse und, je nach seiner Geschwindigkeit, einen bestimmten Impuls und eine bestimmte Energie hat, oft als Teilchen manifestieren; oft aber wird es auch Charakteristika zeigen, die eindeutig zu einer Welle gehören.

Dieser eigenartige Dualismus blieb nur deshalb so lange unbekannt, weil quantenmechanische Effekte nur in der Welt des ganz Kleinen von Bedeutung sind. Ein großer Gegenstand – wie etwa ein Fußball – ist zwar auch mit einer Welle gekoppelt, aber die Wellenlänge ist so klein, daß man sie vollkommen vernachlässigen kann. Wir machen deshalb glücklicherweise keine Fehler, wenn wir bei der Untersuchung, wie sich Fußbälle bewegen, die wellenmäßigen Komplikationen außer Betracht lassen.

Die Wellenlänge eines Teilchens ergibt sich aus einer einfachen Formel, die anzusehen sich lohnt, wenn wir hier auch nicht ihren vollen theoretischen Hintergrund betrachten können. Die Formel lautet:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Hier bedeutet λ (Lambda) die Wellenlänge, m die Masse und v die Geschwindigkeit; h ist eine extrem kleine Zahl, die *Plancksches Wirkungsquantum* heißt*.

Diese Gleichung zeigt uns, daß die Wellenlänge groß ist, wenn Masse und Geschwindigkeit klein sind. Weil die Masse des Neutrons im Vergleich zu unseren Alltagsgegenständen sehr klein ist, kann man leicht erkennen, daß seine Wellenlänge viel größer ist als etwa die eines Fußballs und daß daher Eigen-

* Es ist $h = 6{,}63 \times 10^{-27}$ Erg x Sekunden, wobei »Erg« die Einheit der Arbeit ist; sie vermag eine Masse von einem Gramm über eine Strecke von einem Zentimeter in einer Sekunde um einen Zentimeter pro Sekunde zu beschleunigen. Die Formel ergibt die Wellenlänge in Zentimetern, wenn man m in Gramm und v in Zentimetern pro Sekunde angibt. Ein Erg ist ein ganz geringer Energiebetrag. Wenn ein 1-Grammgewicht 1 Zentimeter tief fällt, erhält es eine Energie von fast 1000 Erg.

schaften, die auf den Wellencharakter hindeuten, viel stärker in Erscheinung treten können. Bei subatomaren Teilchen kann man die Größe, wie Abb. 9 zeigt, der Wellenlänge etwa gleichsetzen.

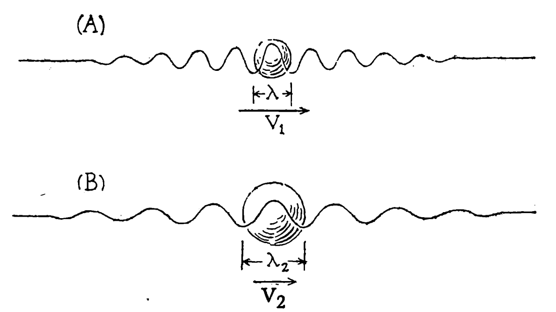


Abb. 9. Geschwindigkeit und Wellenlänge stehen in gewisser Beziehung zueinander. Die Wellenlänge (λ) eines Teilchens hängt von seiner Geschwindigkeit (v) ab. Teilchen B hat größere Wellenlänge als A, weil es sich langsamer bewegt. Je höher die Geschwindigkeit, desto kürzer die Wellenlänge. In der modernen Physik betrachtet man die Wellenlänge eines Teilchens als seine effektive »Größe«, welche, wie abgebildet, von der Geschwindigkeit abhängt.

Obgleich das Neutron eine ganz winzige Masse besitzt, muß seine Geschwindigkeit dennoch sehr klein sein, wenn es ein wirklich eindrucksvolles Wellenverhalten zeigen soll. Neutronen von einer Geschwindigkeit, wie sie sie etwa bei dem zu ihrer Entdeckung führenden Experiment hatten, haben eine so kurze Wellenlänge, daß sie sich ganz wie Teilchen verhalten. So durften wir in den Gleichungen, die für die Massenbestimmung gelten, das Neutron wie ein ganz alltägliches Teilchen behandeln, genauso wie einen Fußball. Verlangsamt man aber das Neutron – weil es keine elektrische Ladung besitzt, wird es dadurch

nicht vollständig abgebremst –, so erkennt man seine Wellennatur deutlicher. Die Geschwindigkeit der Neutronen läßt sich sogar so weit herabsetzen, daß sie ihre Teilcheneigenschaft fast vollkommen verlieren und sich wie reine Wellen verhalten, ganz wie Schall oder Licht.

In diesem Kapitel wollen wir uns besonders mit dem Verhalten ganz langsamer Neutronen befassen, einem Verhalten, das dem des Lichtes vollkommen gleicht. Man kann diese langwelligen Neutronenstrahlen zum Beispiel an sauber polierten Spiegeln reflektieren und beim Eintritt in durchsichtige Materie brechen. Ihre Wellenlänge ist kleiner als die des Lichts; wenn man dies berücksichtigt, kann man praktisch jedes Experiment über die Wellennatur des Lichts auch mit langsamen Neutronen durchführen.

DIE GRÖSSE DER NEUTRONEN

Bisher haben wir in der Welt des Mikrokosmos keinen Wert auf ganz genaue Zahlen gelegt. Jetzt aber ist es an der Zeit, sich mit der wirklichen »Größe« der subatomaren Teilchen zu befassen, mit der Wellenlänge der Neutronen sowie mit den Dimensionen der Atome und Kerne, mit denen sie in Wechselwirkung stehen. Wir werden sehen, daß die Zahlen, mit denen wir es da zu tun haben, im Vergleich zu denen unseres täglichen Lebens unvorstellbar klein sind. So beträgt zum Beispiel die Größe eines typischen Atoms etwa 10^{-8} Zentimeter; das bedeutet, daß man hundert Millionen Atome in einer Reihe anordnen müßte, um eine Strecke von einem Zentimeter zu erhalten, und daß man $10^8 \times 10^8 \times 10^8$ oder 10^{24} Atome brauchte, um einen Kubikzentimeter mit fester Materie zu

füllen. Abbildung 10 zeigt, daß sogar bei Gasen, die doch viel weniger Atome enthalten, die Zahlen noch gewaltig sind. Aus diesen und anderen Gründen machen

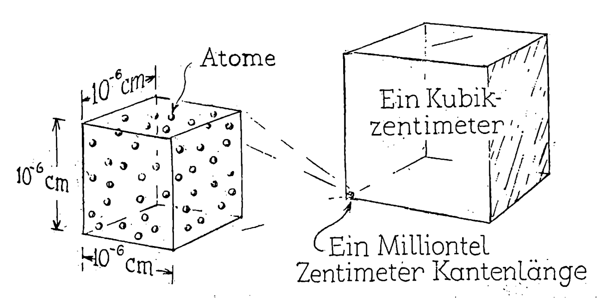


Abb. 10. Ein winziger Würfel von nur ein Milliontel Millimeter Seitenlänge enthält 27 Atome des Gases Helium. In einem Kubikzentimeter sind demnach $10^6 \times 10^6 \times 10^6 \times 27$ *oder* 27×10^{18} *Atome vorhanden.*

Physiker, die gewöhnt sind, mit subatomaren Teilchen umzugehen, ihre Messungen in Einheiten, die von den Metern und Zentimetern unseres Alltagslebens sehr weit entfernt sind; diese Einheiten werden aber nur wegen ihrer größeren Zweckmäßigkeit benützt. Sie lassen sich alle in die altgewohnten Größen umrechnen.

Die Geschwindigkeit eines atomaren Teilchens wird gewöhnlich mit Hilfe seiner Energie ausgedrückt und in einer besonderen Einheit, dem *Elektronenvolt* oder eV, angegeben. Weil diese Einheit in der Kernphysik von fundamentaler Bedeutung ist, wollen wir uns etwas näher mit ihr befassen. Ein Elektronenvolt ist die Energie, die ein Elektron erhält, wenn es eine Spannungsdifferenz von einem Volt durchlaufen hat. So gewinnt ein Elektron beim Durchlaufen einer gewöhnlichen Taschenlampenbatterie eine Energie von

etwa 1,5 Elektronenvolt. Andererseits verliert ein Elektron eine Energie von 220 Elektronenvolt, wenn es durch eine 220-Volt-Lampe läuft, wobei die Energie in Licht und Wärme umgewandelt wird. Wenn auch diese Energieeinheit speziell für das Elektron definiert ist, wird sie doch für *jedes* Teilchen und überhaupt für *jede* Art von Energie verwendet. Das Elektronenvolt ist in der Atom- und Kernphysik deshalb so praktisch, weil die den Teilchen mitgeteilte Energie leicht aus der Spannung der Zyklotrons, Kosmotrons oder Bevatrons abzuleiten ist, in denen die Teilchen beschleunigt werden. Abbildung 11 zeigt an einem Beispiel niederer Energie das Prinzip, wie man auf Teilchen Energie überträgt. Ein Zyklotron erzeugt Energien von der Größenordnung einiger Millionen

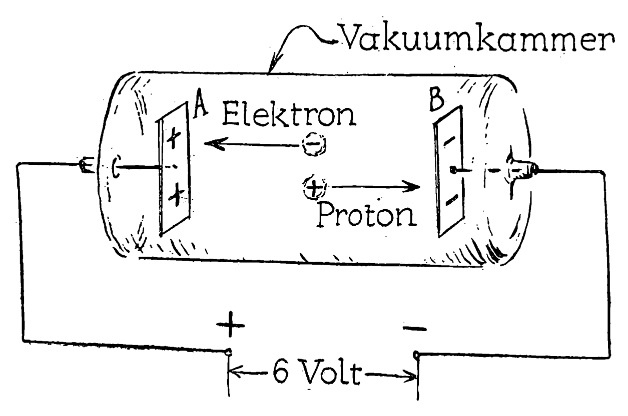


Abb. 11. »Elektronenvolt« ist eine atomistische Energieeinheit. Das elektrische Feld zwischen den Platten A und B läßt die Elektronen nach A und die Protonen nach B wandern. Wenn sie die volle Entfernung zurücklegen, nimmt jedes die gleiche Energie von sechs Elektronenvolt auf. Wegen seiner viel größeren Masse bewegt sich dabei das Proton viel langsamer.

Volt, und die Teilchen, die dieser Spannung ausgesetzt sind, erhalten demgemäß Energien von einigen Millionen Elektronenvolt oder »MeV«. Der letzterwähnte Beschleuniger, das Bevatron, erzeugt sogar Teilchen mit einer Milliarde Elektronenvolt oder einem »GeV« (= Gigaelektronenvolt).

Nun aber zurück zur Wellenlänge des Neutrons. Um eine Wellenlänge von der ungefähren Größe eines Atoms, das heißt 10^{-8} Zentimetern, zu besitzen, muß seine Energie viel geringer sein als die für das Zyklotron typischen Millionen Elektronenvolt. Die Energie darf in der Tat nur 0,1 Elektronenvolt betragen, wenn wir das Neutron so langsam haben wollen, daß seine Wellenlänge etwa 10^{-8} Zentimeter beträgt. Ein Neutron von derartig niedriger Energie denkt man sich besser als Welle statt als Teilchen.

Es ist zwar richtig, daß man in gewissem Sinn die »Größe« des Neutrons gleich seiner Wellenlänge setzen kann, es wäre aber falsch, sich ein Elektron von 0,1 Elektronenvolt als festes Teilchen von 10^{-8} cm Durchmesser vorzustellen. Wie wir sehen werden, kann das Neutron sich zwar so verhalten, als wäre es so groß, zeigt aber dann eher den Charakter einer Welle; in diesem Fall ist es besser, es als solche und nicht als Teilchen zu behandeln.

Natürlich ist diese Dimension von 10^{-8} Zentimetern volle zehntausendmal größer als der Kern (10^{-12} Zentimeter), der selbst wieder Neutronen enthält. Das klingt paradox, ist es aber nicht. Ein Neutron kann sich nur deshalb im Kern aufhalten, weil es sich sehr rasch bewegt und daher eine geringe Wellenlänge oder »Größe« hat. Innerhalb des Kerns hat es die außerordentlich hohe Energie von etwa fünfzig Millionen Elektronenvolt, was der sehr kleinen Wellen-

länge von 10^{-13} Zentimetern entspricht. Wegen dieser großen Energie paßt es also leicht in den Kern.

Meist haben Neutronen, ob man sie nun im Kernreaktor oder im Zyklotron erzeugt, Energien von einigen Millionen Volt. Schickt man diese Neutronen durch Materialien aus leichten Atomen, so vermindert sich ihre Geschwindigkeit durch Zusammenstöße mit Atomkernen, bis sie dieselbe Energie wie die Materialatome selbst haben. Bei Erreichen dieses Gleichgewichts – das heißt, wenn die Neutronen auf gewöhnliche Temperatur »abgekühlt« sind – haben sie eine Energie von ungefähr 0,02 Elektronenvolt und eine Wellenlänge von etwa 2×10^{-8} Zentimeter. Kernreaktoren liefern heutzutage Neutronen dieser Energie in reichlichen Mengen. Man verwendet sie bei zahlreichen Untersuchungen, bei denen das Wellenverhalten der Neutronen eine Rolle spielt. Wir werden jetzt einige der eindrucksvollsten Vorgänge beschreiben, bei denen die Welleneigenschaften langsamer Neutronen besonders gut zu beobachten sind.

DIE BRECHUNG

Eine Erscheinung, die als für Wellenbewegungen besonders charakteristisch gilt, ist die der *Brechung*. Dabei werden Strahlen beim Übergang von einem Medium in ein anderes aus ihrer Richtung abgelenkt; in der Schule haben wir alle gelernt, wie ein Lichtstrahl beim Übergang von Luft in Wasser oder in Glas gebrochen wird. Die Stärke der auftretenden Brechung ist durch den *Brechungsindex* jedes Materials bestimmt. Der Brechungsindex von Wasser ist etwa 1,3, der von Glas etwa 1,5, für Luft liegt er ganz nahe an eins und wird für Vakuum genau eins.

Diese Werte geben uns ziemlich direkt an, wie stark ein Lichtstrahl aus seiner Richtung abgelenkt wird, wenn er von Luft in eine bestimmte Substanz übertritt. Wie Abbildung 12 zeigt, ergibt sich die Ablenkung aus der Gleichung

$$\frac{\sin\ \alpha}{\sin\ \beta} = n$$

wobei α den Einfallswinkel, β den Austrittswinkel und n den Brechungsindex des Materials bedeutet. Aus dieser Gleichung erkennen wir, daß ein Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen wird, wenn er, wie in Abbildung 12, in Glas oder irgendein anderes dichtes Material einfällt, und umgekehrt, daß er beim Austritt vom Lot weg gebrochen wird.

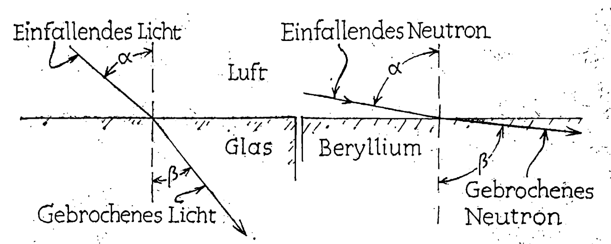


Abb. 12. Licht und Neutronen zeigen beide die Erscheinung der Brechung. Wenn ein Licht- oder Neutronenstrahl in dichtes Material – zum Beispiel Glas bei Licht, Beryllium bei Neutronen – eintritt, wird er abgelenkt. Die Ablenkung ist für Neutronen geringer und geht in entgegengesetzter Richtung.

Für Neutronen gelten dieselben Beziehungen. Beim Übergang eines Neutronenstrahls in ein Material tritt gleichfalls Brechung auf. Der Hauptunterschied zwischen der Brechung von Licht und der von Neutronen besteht darin, daß Neutronen viel weniger abgelenkt werden als das Licht; das heißt, der Brechungs-

index liegt viel näher an eins. Er weicht gewöhnlich nur um etwa 1 Promille davon ab. Dennoch lassen sich diese geringfügigen Ablenkungen experimentell zeigen. Man muß dazu natürlich ein Medium wählen, das für Neutronen zur Demonstration der Brechung »durchsichtig« genug ist. Glas und Wasser kommen hierfür nicht in Frage, aber zum Glück gibt es doch einige derartige Medien, so etwa die Metalle Beryllium und Wismut. Sorgfältige Messungen zeigen, daß Neutronen gewöhnlich in der *entgegengesetzten* Richtung abgelenkt werden wie das Licht. Mit anderen Worten: Der Brechungsindex für Neutronen ist bei den meisten Stoffen *kleiner* als eins. Die hauptsächlichen Charakteristika der Brechung von Licht und Neutronen werden in Abbildung 12 verglichen; als durchsichtiges Material dient Glas bei Licht und Beryllium bei Neutronen.

Es gibt einen ganz speziellen Fall, in dem Neutronen sehr stark gebrochen werden; allerdings ist dieser Effekt schwer zu beobachten. Wenn nämlich unsere Meßanordnung so empfindlich ist, daß wir einzelne, in Atomkerne eindringende Neutronen verfolgen können, so beobachten wir ganz beträchtliche Brechungserscheinungen.

Da sich fast die gesamte Masse eines Atoms auf den winzigen Kern konzentriert, ist seine Dichte sehr groß. Als Folge dieser großen Dichte ist der Brechungsindex des Kerns für Neutronen merklich verschieden von eins, ja er ist sogar mit dem Brechungsindex des Glases für Licht vergleichbar. Die Situation ist zwar nicht ganz dieselbe, denn die Wellenlänge des Neutrons entspricht etwa der Größe des Kerns, während die Wellenlänge des Lichts im Verhältnis zur gläsernen Linse sehr klein ist. Es stellt sich aber

heraus, daß dieser Unterschied nicht von entscheidender Bedeutung ist und die Brechung der Neutronen durch Kerne kaum kompliziert.

Wenn wir feststellen wollen, wie die Neutronenbahnen beim Durchgang durch den Kern abgelenkt werden, müssen wir sehr energiereiche Neutronen verwenden, deren Wellenlänge kleiner als der Kern selbst ist. Wäre die Wellenlänge größer als der Kern, so würden die Neutronen diffus gestreut, genau so wie Licht von kleinen Staubteilchen diffus gestreut wird. In diesem Fall könnten wir keine Brechung beobachten. Wie wir oben sahen, besitzt ein Neutron mit einer Wellenlänge von der Größenordnung des Kerns eine Energie von Millionen Elektronenvolt; bei dieser Energie verhält es sich fast nur wie ein Teilchen, aber auch die Welleneigenschaften sind noch bis zu einem gewissen Ausmaß vorhanden. Das Verhalten von Neutronen mit derartiger Energie beim Durchgang durch Atomkerne liefert wertvolle Aufschlüsse über Größe, Form und Struktur dieser Kerne. An späterer Stelle wollen wir derartige Experimente noch ausführlicher betrachten; im Augenblick wollen wir uns mit der Feststellung begnügen, daß Neutronenstrahlen ganz ähnlich wie Lichtstrahlen gebrochen werden, falls die Bedingung erfüllt ist, daß die Brechungsindices der brechenden Substanzen ähnliche Werte besitzen.

SPIEGEL FÜR NEUTRONEN

Einer der eindrucksvollsten Beweise für die Ähnlichkeit der Neutronen mit Lichtwellen ist ihre Reflexion an Spiegeloberflächen. Die Reflexion ist dann am klarsten zu erkennen, wenn sämtliche Neutronen

reflektiert werden. Wir wollen uns am bekannten Beispiel eines Lichtstrahls, der durch Glas läuft, die Bedingungen für eine derartige *Totalreflexion* wieder ins Gedächtnis zurückrufen. Da der Brechungsindex des Glases für Licht größer als eins ist, folgt aus Abbildung 12, daß Totalreflexion eintritt, wenn ein Lichtstrahl, wie Abbildung 13 zeigt, von *innerhalb*

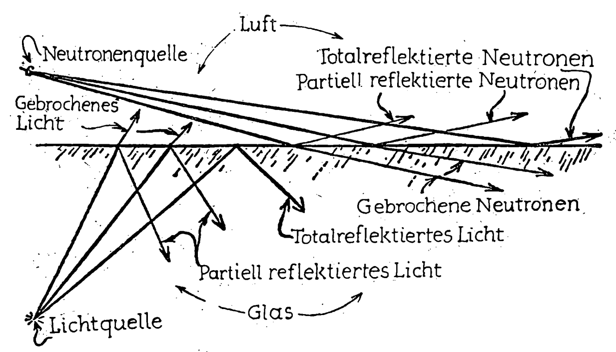


Abb. 13. Hier wird eine weitere Ähnlichkeit zwischen Licht und Neutronen gezeigt. Bei beiden tritt Totalreflexion und partielle Reflexion auf, nur muß die Neutronenquelle außerhalb der reflektierenden Oberfläche liegen, die Lichtquelle innerhalb. Es gibt einen sogenannten Grenzwinkel. Bei flacherem Einfall werden die Strahlen totalreflektiert, bei steilerem Einfall werden sie nur zum Teil reflektiert; der Rest tritt unter Brechung ins andere Medium ein.

des Glases auf eine polierte Glasoberfläche fällt. Der Lichtstrahl wird nur beim Auftreffen innerhalb eines bestimmten Winkelbereiches von der Oberfläche vollständig reflektiert; senkrecht auf die Grenzfläche fallendes Licht tritt aus dem Glas aus. Der Winkel, bei dem die Reflexion total wird, heißt *Grenzwinkel*. Sein Wert läßt sich aus dem Brechungsindex berechnen, wenn man den Winkel α gleich 90 Grad setzt.

Ein wesentlicher Unterschied tritt zwischen Licht und Neutronen bei der Totalreflexion deshalb auf, weil bei den meisten Materialien der Brechungsindex für Neutronen kleiner als eins, für Licht hingegen größer als eins ist. Daraus folgt, daß Neutronen im Gegensatz zum Licht von einer polierten Glasplatte dann vollständig reflektiert werden, wenn sie von *außerhalb* des Glases auf die Oberfläche fallen. In Abbildung 13 sehen wir noch einen weiteren Unterschied: Der für die Totalreflexion mit Neutronen mögliche Winkelbereich ist viel kleiner als der für Licht. Der Brechungsindex liegt so nahe bei eins, daß der Winkel, unter dem die Neutronen auf das Glas treffen, höchstens ein Grad betragen darf, wenn noch Totalreflexion auftreten soll. Wegen des begrenzten Winkelbereiches und der viel kürzeren Wellenlänge ist es weitaus schwieriger, einen Spiegel für Neutronen, als einen für Licht herzustellen. Dennoch ist es, wie Enrico Fermi als erster zeigte, möglich, Neutronen an Spiegeln aus den verschiedenartigsten Materialien zu reflektieren; Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß die Spiegeloberfläche vollständig eben ist. In der Praxis erhält man solche vollkommen ebenen Spiegel, wenn man Flüssigkeitsoberflächen verwendet. So kann man Neutronenstrahlen an der Oberfläche von Quecksilber totalreflektieren; dazu muß man das Quecksilber zur Vermeidung von Wellen natürlich ganz ruhig halten.

Die Reflexion an Spiegeloberflächen liefert wirklich ins Auge fallende Beweise für die Welleneigenschaft langsamer Neutronen. So hängt zum Beispiel der Grenzwinkel der Totalreflexion von den Gesamteigenschaften des Spiegelmaterials, nicht aber von den Eigenschaften einzelner Atome ab. Selbst wenn

das Material, etwa Eisen, aus vielen Kristalliten besteht, werden alle Neutronen unter demselben Grenzwinkel reflektiert, ganz als ob die Verschiedenheiten von Kristallit zu Kristallit gar nicht bestünden. Ein solches Verhalten ist besonders beeindruckend, wenn wir uns daran erinnern, daß die Wellenlänge der Neutronen im Verhältnis zu den einzelnen Kristallkörnern winzig ist; in der Tat ist sie zehntausendmal kleiner! Die Erklärung liegt in der Tatsache, daß das am Spiegel reflektierte Neutron sich nicht wie ein Teilchen benimmt, sondern wie eine ausgedehnte Welle, die gleichzeitig an *allen* Atomen der gesamten Oberfläche reflektiert wird, selbst wenn der Durchmesser der Oberfläche mehrere Zentimeter beträgt. Kleine Teilchen müßten sich da vollkommen anders verhalten: Jedes Teilchen würde einen ganz bestimmten Punkt des Spiegels treffen.

Und dennoch benehmen sich, wie Abbildung 14

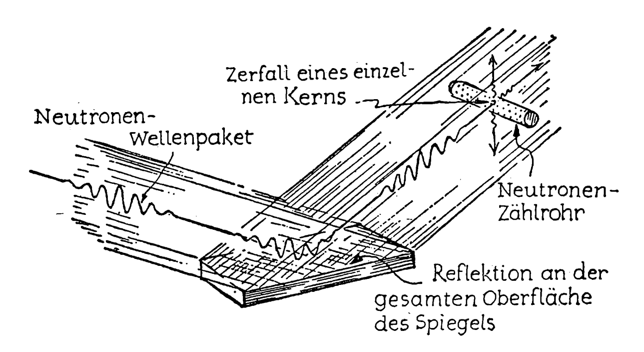


Abb. 14. Wellen- und Teilchenverhalten von Neutronen kann man mit einer einzigen Versuchsanordnung zeigen. Das Neutron breitet sich über die gesamte Spiegeloberfläche aus, verhält sich also wie eine Welle, und wird dennoch im Zähler als Teilchen registriert.

zeigt, bei ebendiesem Versuch die Neutronen auch wie wirkliche Partikel. Das verwirrt unseren »gesunden Menschenverstand« vollkommen. Man beobachtet die reflektierten Neutronen mit Hilfe eines »Neutronenzählers«, in welchem jedes *einzelne* Neutron mit einem *einzelnen* Kern reagiert. Der Kern zeigt durch seinen Zerfall die Gegenwart des Neutrons an. Der Versuch über die Reflexion am Spiegel zeigt uns die beiden Seiten der Quantenmechanik – und die Rätselhaftigkeit der Erscheinungen in der Welt des ganz Kleinen. Das Neutron demonstriert hier instruktiv die Dualität aller Materie. Zuerst tritt es als ausgedehnte Welle auf, wenn man es an einer Spiegeloberfläche reflektiert, und stößt gleich danach mit einem einzelnen Kern zusammen. Wir müssen die Tatsache akzeptieren, daß die Neutronen gleichzeitig Wellen- und Teilcheneigenschaften besitzen können, obgleich etwas Derartiges unserer normalen Erfahrung unverträglich erscheint. Es ist das große Verdienst der Quantenmechanik, diese beiden sich scheinbar widersprechenden Seiten im Verhalten der Materie miteinander koordiniert zu haben.

Bei der Untersuchung sehr langsamer Neutronen fanden wir eindrucksvolle Beispiele dafür, wie kleine Teilchen den Gesetzen der für unsere Alltagserfahrung so fremden Quantenmechanik gehorchen. Die wellenchemanischen Eigenschaften unserer Umwelt können wir mit bloßem Auge nicht beobachten; die praktischen Folgen dieser Eigenschaften, zum Beispiel die Atomkraftwerke, erkennen wir desto deutlicher. Solche großartigen Erfolge hätten ohne die genaue Kenntnis dieser Grundprinzipien niemals erzielt werden können.

Viertes Kapitel

DAS INNERE DES NEUTRONS

Als erste wichtige Eigenschaften des Neutrons hatte man seine Masse, das Fehlen der elektrischen Ladung und seine Funktion beim Aufbau der Atomkerne untersucht. Im bisherigen Verlauf unserer Geschichte vom Neutron haben wir diese Eigenschaften kurz behandelt, sind aber dabei noch nicht, um diesen Ausdruck zu gebrauchen, bis ins Innere des Neutrons vorgedrungen und haben auch noch nicht die Möglichkeit in Betracht gezogen, daß es vielleicht aus kleineren Teilchen zusammengesetzt sein könnte. Zwar war dies nach den ersten Untersuchungen noch nicht deutlich, aber später zeigte es sich, daß das Neutron keineswegs ein einfaches Teilchen ist, welches sich nicht weiter umwandeln läßt.

Zu der Zeit, als man noch ganz wenig über Neutronen, Protonen und Kerne wußte, glaubte man, Neutron und Proton seien »Elementarteilchen«. Das heißt, man hielt sie nicht nur für elementare Bestandteile aller Materie, sondern auch für in sich abgeschlossene, nicht mehr weiter aufspaltbare Partikel. Die Vorstellung einfacher, endgültiger, unveränderlicher Teilchen hat schon seit eh und je große Anziehungskraft, aber genau wie die Atome und später die Atomkerne zeigten auch Neutronen und Protonen eine innere Struktur – ja, sie erwiesen sich sogar als grundsätzlich veränderlich. Bei aller inneren Kompliziertheit sind Neutron und Proton aber doch elementare und einfache Teilchen. Sie sind elementar, weil sie die Grundbausteine der Materie darstellen, und einfach,

weil sie unmittelbar zeigen, wie die Gesetze der Quantenmechanik von aller Materie befolgt werden.

Einige dieser Gesetze haben wir bereits kennengelernt, als wir die Welleneigenschaften des Neutrons untersuchten, doch haben wir dabei seine wirkliche Struktur nicht in Betracht gezogen. Jetzt wollen wir uns mit den »inneren« Eigenschaften befassen. Wenn wir den inneren Aufbau des Neutrons studieren, fallen viele Komplikationen weg, die uns sonst die Analyse der Materie erschweren, und wir erkennen die zugrunde liegenden Gesetze der Natur vielleicht etwas klarer. Diese Möglichkeit, aus dem Studium eines »einfachen« Objektes grundlegende Erkenntnisse zu gewinnen, hat Tennyson in wunderbarer Weise ausgedrückt:

> Blume du, aus dem Blumenkissen
> der Wiesen pflückt ich dich heute
> und halt dich entwurzelte in der Hand –
> kleine Blume, könnt' ich dich deuten,
> Wurzel und Blüte, würd' ich auch wissen,
> was Gott und sein Mensch bedeute.

Wir wissen natürlich, daß die Blume in Wirklichkeit kein einfaches Objekt ist. Ebenso ist, wie wir herausfinden werden, auch unser Neutron nicht etwa ein winziger Bestandteil der kleinen Blume. Wenn wir auch nicht hoffen dürfen, das Neutron jemals sehen zu können, wie wir etwa die Blume sehen, so werden wir doch das Wunder und die Schönheit seines inneren Aufbaus würdigen lernen.

DAS NEUTRON ZERFÄLLT

Wir haben die Masse des Neutrons – sie ist um etwa 1 Promille größer als die des Protons – bereits erwähnt und auch schon angedeutet, daß aus dieser winzigen Differenz bedeutende Konsequenzen erwachsen. Die kleine Massendifferenz ließ von Anfang an eine Instabilität des Neutrons und seinen spontanen Zerfall in ein Proton erwarten. Dabei mußte Energie frei werden, denn auf Grund der im Jahre 1905 von Albert Einstein durch seine Relativitätstheorie postulierten Äquivalenz von Masse und Energie konnte man dem Neutron mehr Energie zuschreiben als dem Proton. Wenn sich ein Neutron in ein Proton verwandelte, mußte etwas Masse verschwinden; diese stellt zwar nur einen geringen Bruchteil der Protonenmasse dar, ist jedoch als Energiebetrag recht erheblich.

Die Einsteinsche Grundgleichung $E = mc^2$ befaßt sich in keiner Weise mit dem speziellen Prozeß, durch den Masse in Energie übergeführt wird, und sagt auch nichts darüber aus, in welcher Form die frei werdende Energie auftritt. Sie nennt aber den genauen Betrag der bei einer solchen Umwandlung freigesetzten Energie*. Die spontane Umwandlung schwerer Kerne in leichte unter Freiwerden von Energie ist seit etwa 1900 bekannt, nämlich seit der Entdeckung der *Radioaktivität* der schweren Elemente. Der Betrag der gewonnenen Energie wird durch Einsteins Formel exakt wiedergegeben; die in Energie umgesetzte Masse (m)

* Dieser Betrag ist deshalb so groß, weil c, die Lichtgeschwindigkeit, 3×10^{10} Zentimeter pro Sekunde beträgt. Eine Masse (m) von einem Kilogramm ist einer Energie von 9×10^{23} Erg oder 24 Milliarden Kilowattstunden äquivalent!

ist gleich der Differenz zwischen der Masse des zerfallenden Atoms und der jenes Atoms, in das es sich umgewandelt hat.

Demzufolge mußte die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, falls sie überhaupt auftrat, eine der einfachsten radioaktiven Umwandlungen darstellen. Mit ziemlicher Sicherheit mußte bei diesem Prozeß ein Elektron frei werden, damit für das Proton eine erwartungsgemäß positive Ladung verbleiben konnte. Zwar gab es keinen Grund, diese Argumente in Zweifel zu ziehen, doch konnte man nicht vorhersehen, wie lange das Neutron bis zu seinem Zerfall leben würde. Nach der Einsteinschen Gleichung ließ sich aber der Betrag bei der Umwandlung freiwerdender Energie leicht aus der Massendifferenz zwischen Neutron und Proton berechnen. Es ergab sich ein Wert von einer Million Elektronenvolt.

Weil es in den ersten Jahren nach der Entdeckung des Neutrons noch nicht möglich war, größere Mengen von Neutronen für Experimente zu erzeugen, hielt man es für unwahrscheinlich, daß man diese elementarste Form der Radioaktivität jemals würde beobachten können. Etwas später aber, als die ersten großen Kernreaktoren anliefen, hatte man plötzlich enorme Mengen von Neutronen zur Verfügung, und zwar jene Neutronen, die bei der Kettenreaktion im Reaktor entstehen und durch ein Loch in der umgebenden Wand als »Strahl« freier Neutronen den Reaktor verlassen. Bei so hoher Neutronendichte im Strahl war zu erwarten – falls sich die Theorie bestätigen sollte –, daß einige Neutronen beim Passieren eines geeigneten Anzeigeinstrumentes direkt vor dem Reaktor zerfallen würden und man dieses Phänomen würde beobachten können.

Dieser Zerfall ließ sich wirklich nachweisen. Bei dem Versuch waren zwei Zählrohre – eines für Protonen und eines für Elektronen – an zwei einander gegenüberliegenden Seiten des Neutronenstrahls aufgestellt, wie es Abbildung 15 zeigt. Auf Grund der

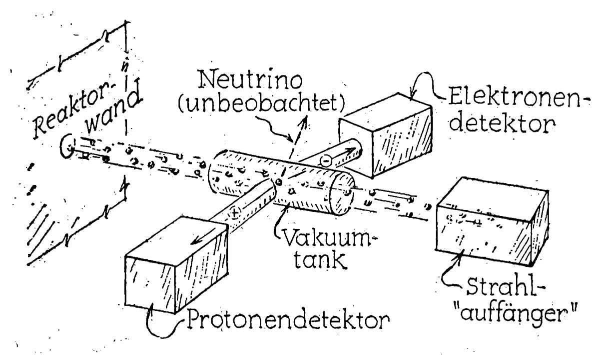


Abb. 15. In dieser Versuchsanordnung wird der Neutronenzerfall beobachtet. Beim Zerfall entsteht ein Proton und ein Elektron, die sich feststellen lassen, falls sie in die angezeigten Richtungen fliegen. Das mysteriöse Neutrino bleibt unbeobachtet. Die Ursache des Zerfalls ist noch nicht genau bekannt.

Beobachtung, daß ab und zu gleichzeitig im einen Instrument ein Proton und im anderen ein Elektron registriert wurde, konnten die Atomphysiker beweisen, daß das Neutron tatsächlich in der erwarteten Weise zerfällt. Überdies enthüllten sorgfältige Messungen der Elektronen und Protonen noch einen weiteren wichtigen Aspekt des Neutronenzerfalles.

Wenn Elektron und Proton die *einzigen* Zerfallprodukte wären, müßten sie auf Grund des Impulserhaltungssatzes – einem der Grundgesetze der Mechanik – stets in genau entgegengesetzter Richtung auseinanderfliegen. (Impuls ist das Produkt aus Masse

und augenblicklicher Geschwindigkeit eines Körpers. Weil der Impuls eine Richtung besitzt, nennt man ihn, im Gegensatz zu den ungerichteten Größen, einen Vektor. Impulse sind zeichnerisch oder trigonometrisch unter Berücksichtigung der Richtung vektoriell zu addieren. Der Erhaltungssatz besagt, daß in einem geschlossenen System, in dem verschiedene Körper aufeinander Kräfte ausüben, die vektorielle Summe aller Impulse konstant bleiben muß, auch wenn sich die Einzelbewegungen ändern.)

Das Verhalten der Zerfallsprodukte bei der »Explosion« des Neutrons bedeutete aber, daß entweder der Erhaltungssatz nicht galt oder daß ein Teil der Energie von einem geheimnisvollen dritten Teilchen entführt wurde. Weil nun die Physiker den Impulssatz ebenso ungern aufgeben würden wie die anderen Grundgesetze, zum Beispiel den Satz von der Erhaltung der Energie, forderten sie die Existenz eines mysteriösen dritten Teilchens mit Ladung Null und Masse Null. Der italienische Physiker Enrico Fermi nannte es »Neutrino« oder »kleines Neutron«. Weil dem Neutrino Ladung und Masse fehlen, ist über das Teilchen selbst nur wenig bekannt. Daß jedoch das Neutrino beim Neutronenzerfall eine Rolle spielt, ist – allerdings nur indirekt – durch die Tatsache bewiesen, daß Proton und Elektron *nicht* immer, wie der Erhaltungssatz fordert, in entgegengesetzter Richtung emittiert werden. Diese Art und Weise, wie das Neutrino entdeckt wurde, wirft ein ganz bezeichnendes Licht auf die indirekten Methoden, mit denen die Physiker heute arbeiten.

Auch die beim Neutronenzerfall freigesetzte Energie konnte bestimmt werden. Es erwies sich, daß sie bei jedem Zerfallsprozeß gleich groß ist, voraus-

gesetzt, daß man den vom Neutrino entführten Energiebetrag entsprechend berücksichtigt. Man fand für die Zerfallsenergie genau den aus der Massendifferenz zwischen Neutron und Proton berechneten Wert, etwa eine Million Elektronenvolt. Weiterhin ergab sich aus dem Vergleich der Anzahl der zerfallenden mit der Anzahl der im Strahl überhaupt vorhandenen Neutronen die mittlere Zerfallszeit der Neutronen – etwa zehn Minuten. Diese relativ lange Lebensdauer erklärt die Tatsache, warum bei früheren Experimenten der Zerfall der Neutronen nicht zu beobachten war.

Innerhalb eines Kernes verhalten sich die Neutronen jedoch ganz anders. Hätte nämlich auch dort das Neutron nur eine Lebensdauer von zehn Minuten, so würden bald alle Kerne nur aus Protonen bestehen, und die Materie wäre nicht mehr stabil. Offensichtlich sind nur freie Neutronen, fern vom Einfluß anderer Kernbestandteile, dem radioaktiven Zerfall unterworfen; innerhalb eines Kerns wird ein Neutron entscheidend von seinen Nachbarn beeinflußt. Zwar können auch dort rasche Austauschvorgänge auftreten, aber die Gesamtzahl der Neutronen und Protonen im Kern bleibt konstant.

Kehren wir nun zum Zerfall des freien Neutrons zurück, so müssen wir eine wichtige Frage stellen, die den Ursprung des Elektrons betrifft: Wie entweicht ein Elektron aus einem Neutron, das doch bestimmt keine Elektronen enthält? Bei vielen Arten radioaktiven Zerfalls tritt dasselbe Problem auf: Elektronen treten aus Kernen aus, in denen, wie wir bereits gesehen haben, kein Elektron vorhanden sein kann. Die Struktur des Neutrons muß in der Tat viel komplizierter sein, als man in der Zeit kurz nach

seiner Entdeckung annahm. Elektronen können auf keinen Fall innerhalb von Neutronen existieren, aber irgendwie müssen sie während des Zerfallsprozesses aus den Bestandteilen des Neutrons entstehen.

Einige Jahre nach der Entdeckung des Neutrons stellte man fest, daß Neutronen stets mit einer gewissen Art von leichteren Teilchen gekoppelt sind, die man *Mesonen* nennt. Das Meson war 1936 aus rein theoretischen Gründen von dem japanischen Physiker H. Yukawa vorhergesagt worden, um die ungeheuren Kräfte zu erklären, die im Kern wirksam sind. Diese Mesonen, mit etwa einem Siebentel der Masse des Neutrons, aber der dreihundertfachen Elektronenmasse, entstehen laufend aus dem Neutron und werden wieder von ihm absorbiert, ohne aus der Gesamtstruktur entweichen zu können. Ein einzelnes, von Kernbestandteilen getrenntes Meson zerfällt fast augenblicklich und verwandelt sich innerhalb einer Milliontel Sekunde in ein Elektron und ein Neutrino. Zwar ist es nicht möglich, den Neutronenzerfall hier in allen Einzelheiten zu behandeln, und überdies weiß man bis jetzt über diesen Prozeß nur sehr wenig, aber so viel können wir sehen, daß die Mesonen den Schlüssel zur Erklärung bilden. Mesonen sind stets mit Neutronen gekoppelt, existieren praktisch »in« ihnen, ohne sie normalerweise zu verlassen. Elektronen können das wegen ihrer kleineren Masse und ihres entsprechend größeren »Volumens« nicht. Beim Neutronenzerfall entsteht das Elektron in ähnlicher Weise aus dem Meson, wie das Meson aus dem Neutron entsteht.

Die Kopplung von Mesonen mit Neutronen ist nicht etwa nur eine Hypothese zur Erklärung der Elektronenemission – Neutronen zeigen noch genü-

gend andere Erscheinungen, die die Existenz und einige elementare Eigenschaften dieser allgegenwärtigen Mesonen beweisen. Wir wollen uns jetzt mit einer Eigenschaft des Neutrons befassen, die einen zwingenden Beweis dafür darstellt, daß ein Meson in ihm vorhanden sein muß.

DAS NEUTRON ALS MAGNET

Von den meisten Dingen, die uns umgeben, wissen wir gar nicht, daß in ihnen magnetische Kräfte wirksam sind, denn die an ihnen auftretenden magnetischen Felder sind äußerst schwach. Einige wenige Metalle aber, deren bekanntestes Eisen ist, können stark magnetisch werden. Ein Eisenstab läßt sich in einen starken Magneten verwandeln, wenn man ihn ins Innere einer von einem kräftigen elektrischen Strom durchflossenen Drahtspule bringt. Der Stab zeigt dann typisch magnetische Eigenschaften: Er zieht Eisenstücke an und stellt sich, wenn man ihn freibeweglich aufhängt, parallel zum erdmagnetischen Feld, ganz wie eine Kompaßnadel.

Auch das Neutron ist von einem magnetischen Feld umgeben und stellt so einen kleinen Magneten dar, der sich ähnlich wie eine magnetisierte Eisenstange verhält. Man konnte die magnetischen Eigenschaften des Neutrons mit Hilfe von einfachen Experimenten beweisen, bei denen man das Durchdringungsvermögen von Neutronenstrahlen durch Eisenblech untersuchte. Dieses Durchdringungsvermögen erwies sich als sehr stark davon abhängig, ob das Eisen magnetisiert war oder nicht. Es ist leicht einzusehen, daß hiermit die magnetische Eigenschaft des Neutrons bewiesen ist, denn da die Magnetisierung des Eisens nur

das Magnetfeld um die Eisenatome beeinflußt und keine Wirkung auf die Kerne hat, zeigt die starke Abhängigkeit der Neutronenintensität vom Magnetisierungszustand des Eisens, daß das Neutron vom magnetischen Feld der Eisenatome stark beeinflußt wird. Daraus folgt aber notwendigerweise, daß das Neutron selbst von einem Magnetfeld umgeben, das heißt, selbst ein Magnet ist. Andernfalls hätte man keine Wirkung beobachtet.

Das Neutron ist *elektrisch* neutral; das bedeutet aber keineswegs, daß es nicht *magnetisch* sein könnte, obgleich Magnetfelder ihre Ursache in bewegter elektrischer Ladung haben. Innerhalb eines Eisenstabes bestehen die bewegten Ladungen, die das Magnetfeld erzeugen, aus Elektronen, die in den Atomen umlaufen. Und doch ist jedes Atom als Ganzes elektrisch neutral, weil die Elektronenladungen durch die positive Ladung der Atomkerne des Eisens kompensiert werden. Im Neutron ist, wie Abbildung 16 zeigt, die Situation analog. Hier stellt das ans Neutron gekoppelte Meson die bewegte Ladung dar. Das negativ geladene Meson kreist innerhalb des Neutrons, bildet so einen elektrischen Strom und verursacht das Magnetfeld des Neutrons. Da nun aber das Neutron elektrisch neutral ist, muß in seinem Zentrum eine positive Ladung sitzen, um die das Meson auf seiner Bahn läuft.

Im Magnetismus des Neutrons haben wir also einen weiteren, schwerwiegenden Beweis für seinen komplizierten Aufbau. Wir dürfen annehmen, daß es – wenigstens zeitweise – aus einem positiven Zentrum besteht, das von einem negativen Meson umgeben ist. Weil beim Zerfall des Neutrons ein Proton übrig bleibt, liegt die Vermutung nahe, daß eben ein

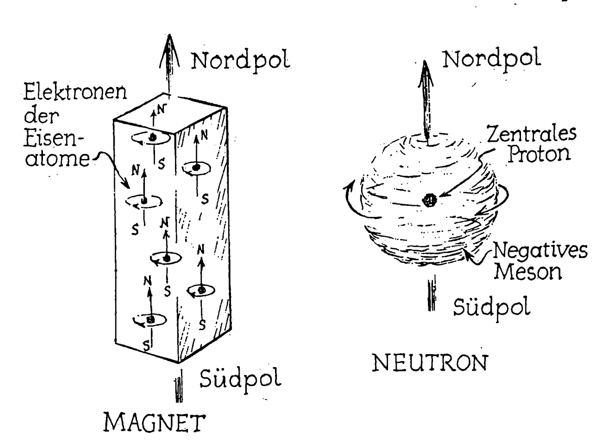


Abb. 16. Der Magnetismus des Neutrons läßt sich mit der Magnetisierung eines Eisenstabes vergleichen. In beiden erzeugen bewegte elektrische Ladungen das magnetische Feld. Im Eisen stellen Elektronen den Strom dar, im Neutron das negativ geladene Meson. Der Magnetismus ist ein weiterer Beweis für die komplexe Natur des Neutrons.

solches Proton das positiv geladene Zentrum darstellt, das man zur Erklärung des Magnetfeldes benötigt. Des weiteren kann man aus der gemessenen magnetischen Feldstärke des Neutrons ungefähr die Zeit abschätzen, während der das Neutron in ein Proton und ein um dieses laufendes Meson aufgespalten ist. Dieser Zustand dauert immer nur ganz kurze Zeit, bis er sich wieder ausgleicht; er reicht aber aus, um ein deutliches magnetisches Verhalten zu bewirken. Die Einzelheiten des Vorganges, mit dessen Hilfe das Meson ein magnetisches Feld erzeugt und nach einer Lebensdauer von etwa zehn Minuten in ein Elektron und ein Neutrino zerfällt, sind noch keineswegs vollständig bekannt, und es wird noch einige Zeit und viel Arbeit brauchen, bis diese Rätsel ganz gelöst sein

werden. Aber gerade die noch nicht genau bekannten Einzelheiten sind für das gesamte Verständnis von Neutronen, Protonen, Atomen und Molekülen außerordentlich wichtig.

POLARISIERTE NEUTRONEN

Wie wir alle wissen, ist jeder Magnet in einer ganz bestimmten Weise ausgerichtet. Ein Ende bezeichnen wir als Nordpol, das andere als Südpol. Diese Namen leiten sich von der Richtung ab, in welche der Magnet zeigt, wenn man ihn freibeweglich aufhängt. Der Südpol eines Magneten stößt den Südpol eines anderen Magneten ab, zieht aber den Nordpol an. Am Neutron, das ja ebenfalls ein kleiner Magnet ist, können wir dasselbe Verhalten erwarten. Und in der Tat sind Neutronen deutliche Beispiele für alle Eigenschaften, die Magneten aufweisen, und wir können aus diesen Eigenschaften wertvolle Erkenntnisse über die Struktur des Neutrons, aber auch über den Magnetismus der Atome gewinnen.

Wie ein Magnet, »zeigt« das Neutron in irgendeine Richtung, und in einem Neutronenstrahl, der aus einem Kernreaktor austritt, sind die Neutronen wahllos nach allen Richtungen orientiert. Es ist aber auf verschiedene Weise möglich, die Neutronen einheitlich auszurichten; wir sprechen dann von einem *polarisierten Neutronenstrahl.* Erzeugung und Eigenschaften eines solchen polarisierten Neutronenstrahls haben viel Ähnlichkeit mit polarisiertem Licht, wenn auch der zugrunde liegende Mechanismus in Wirklichkeit ganz anders ist. Beim Licht wird durch die Polarisation die Richtung der elektrischen und magnetischen Schwingungen, die das Licht repräsentieren,

beeinflußt, während bei einem Neutron durch die Polarisation die Richtung der Magnetisierung in bestimmter Weise verändert wird. Dennoch sind die Eigenschaften polarisierter Neutronen denen von polarisiertem Licht ähnlich. Die Strahlen werden mit Hilfe eines Polarisators erzeugt und in einem Analysator untersucht, und die Polarisationsrichtung läßt sich auf analoge Weise verändern.

Die einfachste Methode zur Erzeugung polarisierter Neutronen besteht darin, einen langsamen Neutronenstrahl durch eine stark magnetisierte Eisenplatte zu leiten. Abbildung 17 zeigt diese Methode.

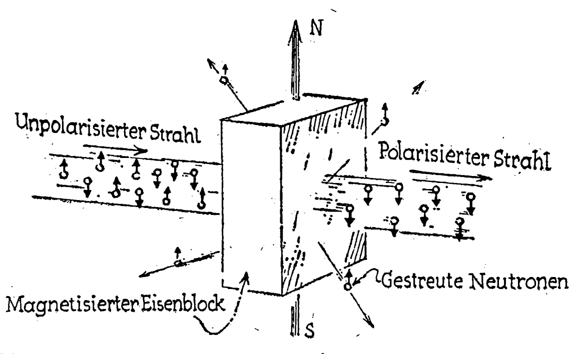


Abb. 17. Man erzeugt polarisierte Neutronen, indem man einen Neutronenstrahl durch stark magnetisiertes Eisen schickt. Neutronen, deren Feld dem Feld des Eisens parallel gerichtet ist, werden gestreut. Neutronen entgegengesetzter Richtung wurden durchgelassen. Bei genügender Dicke des Eisenblocks erhält man einen stark polarisierten Strahl.

Innerhalb des Eisens werden die Neutronen, deren magnetische Ausrichtung der des Eisens entspricht, abgestoßen und aus dem Strahl herausgestreut; die anderen Neutronen durchdringen das Eisen leichter. Wenn nun die Eisenplatte dick genug ist (mehrere

Zentimeter), so sind die durchgelassenen Neutronen zum größten Teil magnetisch dem Eisen entgegengesetzt ausgerichtet; sie sind stark polarisiert. Einen *vollkommen* polarisierten Neutronenstrahl kann man durch Reflexion am Spiegel erzeugen, wobei man die im letzten Kapitel beschriebene Methode der Totalreflexion anwendet. Wenn man den Spiegel magnetisiert (Abbildung 18) und wenn ihn der Strahl

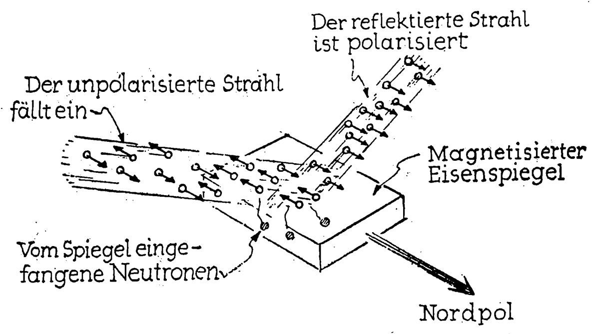


Abb. 18. Zur Erzeugung von vollständig polarisierten Neutronenstrahlen benützt man, wie hier dargestellt, magnetisierte Spiegel. Neutronen, deren Orientierung mit dem Magnetfeld des Spiegels übereinstimmt, werden totalreflektiert. Die anderen dringen in den Spiegel ein und scheiden somit aus dem Strahl.

unter dem richtigen Winkel trifft, werden nur die Neutronen reflektiert, deren Magnetfelder in die gleiche Richtung zeigen wie die des Spiegels, während die anderen ohne jegliche Reflexion in den Spiegel eindringen. Folglich zeigen *alle* Neutronen des reflektierten Strahles in die Magnetisierungsrichtung. Der reflektierte Strahl ist vollkommen polarisiert.

Polarisierte Neutronenstrahlen verwendet man, um die magnetische Struktur von Eisen oder ähnlichen Materialien direkt zu untersuchen. Die Neu-

tronen laufen durch die einzelnen Atome hindurch und dringen tief in das Eisen ein. Dabei machen sie den Einfluß der einzelnen Atome sichtbar, im Gegensatz zu den anderen magnetischen Messungsmethoden, mit deren Hilfe man nur über viele Atome gemittelte Durchschnittswerte erhält. Durch die Untersuchung der Art und Weise, wie Neutronen abgelenkt werden, wie sich ihre Polarisation ändert oder wie sie gar depolarisiert werden, erhalten wir genaue Kenntnis über den Verlauf des magnetischen Feldes innerhalb des Eisens. Die Resultate dieser Methode sind direkter und eindeutiger, als man sie bei den meisten anderen Verfahren erwarten kann. Eines dieser anderen Verfahren besteht zum Beispiel darin, das äußere Magnetfeld des Objektes zu messen; aus den Ergebnissen läßt sich aber für das Magnetfeld der Atome nur ein Durchschnittswert gewinnen. Polarisierte Neutronen haben es auch möglich gemacht, das Magnetfeld des Neutrons selbst mit großer Genauigkeit zu messen; dazu bestimmt man die magnetische Feldstärke, die zur Depolarisation eines Neutronenstrahls nötig ist. Das Neutronenfeld besitzt für die Mesonentheorie der Neutronen, mit der wir uns anschließend befassen wollen, eine tiefere Bedeutung.

DIE STRUKTUR DES NEUTRONS

Noch haben wir im bisherigen Verlauf unseres Berichtes keine direkten Tatsachen angeführt, die uns die wirkliche Struktur des Neutrons eindeutig erschließen könnten; noch haben wir keinen Beweis für die Annahme, daß im Zentrum des Neutrons eine positive Ladung sitzt, um die ein negatives Meson kreist. Wir hatten ja das Meson nur postuliert, um

zwei Eigenschaften des Neutrons erklären zu können, nämlich sein magnetisches Feld und seinen Zerfall in Proton und Elektron. Zwar wäre es äußerst schwierig, ohne das Meson eine Erklärung für diese Erscheinungen zu finden; das beweist aber keineswegs, daß unsere Vorstellungen (Abbildung 19) richtig sind.

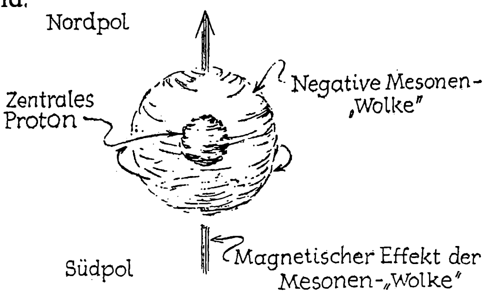


Abb. 19. Die innere Struktur des Neutrons ist keineswegs einfach, und wir kennen sie kaum. Das Tatsachenmaterial unterstützt in gewisser Hinsicht die hier abgebildete Vorstellung vom Verhalten des Neutrons. Für ganz kurze Augenblicke spaltet sich das Neutron in ein positiv geladenes Zentrum (Proton) und in eine darum umlaufende Mesonen-»Wolke«.

Aber ist es nicht möglich, die Struktur des Neutrons durch ein Experiment direkt zu beweisen? Wir sind in einer ganz ähnlichen Lage wie seinerzeit Rutherford, als er zeigte, daß ein Atom aus einem massiven, positiv geladenen Kern und aus darum kreisenden Elektronen besteht. Unglücklicherweise ist aber am Neutron eine Art von Rutherford-Versuch viel schwieriger durchzuführen: Einmal haben wir nur ganz geringe Mengen freier Neutronen, die wir beschießen können; zum zweiten brauchen wir ungeheuer hochenergetische (und daher »kleine«) Teilchen, damit sie überhaupt in das Neutron hineinpassen. Erst in jüng-

ster Zeit gelang es mit Hilfe zweier Experimente, direkte Auskunft über die innere Struktur des Neutrons zu erhalten. Leider widersprechen sich aber diese Experimente – wenigstens soweit wir sie heute überblicken können –, und die Physiker haben große Mühe, die Ergebnisse beider Versuche auf einen Nenner zu bringen.

Beim ersten Experiment durchläuft ein Strahl langsamer Neutronen verschiedene Materialien; empfindliche Instrumente messen die geringe Streuung, die auftritt, wenn die Neutronen mit den Elektronen des Stoffes zusammenstoßen. Der Versuch ist sehr schwierig, weil der geringe Streueffekt der Elektronen durch den viel größeren der Atomkerne verdeckt wird. Wenn wir aber zuerst ein Material wie Wasserstoff verwenden, dessen Atome nur sehr wenig Elektronen enthalten, und dann etwa Uran, in dem viele Elektronen sitzen, so können wir die von den Elektronen allein verursachte Streuung erkennen.

Wie wir bereits erwähnt haben, beobachtet man dabei eine Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld des Neutrons (dessen Ursache das umlaufende Meson ist) und den Magnetfeldern der Materialatome (die von den Elektronen erzeugt werden). Dies ist die wohlbekannte magnetische Wechselwirkung, die man zur Polarisation der Neutronen verwendet. Das Erstaunliche ist aber, daß sich keine zusätzliche *elektrische* Wechselwirkung beobachten läßt, wie man sie eigentlich erwarten müßte, wenn sich Neutron und Elektron so nahe sind, daß sich das Elektron gewissermaßen »innerhalb« des Neutrons aufhält – d.h. zwischen dem Meson und dem positiv geladenen Zentrum des Neutrons, von dem es doch angezogen werden müßte. Dieses Ergebnis ist genauso verwunder-

lich, wie wenn Rutherford keine Streuung der Alpha-Teilchen gefunden hätte, als er sie innerhalb der Elektronenschalen der Atome am positiv geladenen Kern vorbeifliegen ließ.

Diesem »Elektron-Neutron«-Experiment haben wir zu entnehmen, daß es innerhalb des Neutrons keine auf einen Punkt zusammengedrängte, von einem negativen Meson umkreiste positiv elektrische Ladung gibt; vielmehr muß das Neutron in seinem ganzen Volumen fast vollkommen neutral sein! Bevor wir uns aber der Frage zuwenden, ob sich dieses Ergebnis mit den anderen Eigenschaften des Neutrons irgendwie in Einklang bringen läßt, wollen wir uns kurz dem zweiten Experiment zuwenden, das uns ebenfalls einigen Aufschluß über das Innere des Neutrons gibt. Bei diesem Versuch werden Neutronen mit sehr schnellen Elektronen beschossen, die eine Energie von mehreren hundert Elektronenvolt aufweisen. Weil uns als Auffänger keine freien Neutronen zur Verfügung stehen, bleibt uns als brauchbarer Ausweg nur die Methode, den Effekt eines Auffängers aus gewöhnlichem Wasserstoff mit dem eines Auffängers aus »schwerem Wasserstoff« oder *Deuterium* zu vergleichen. Der Deuteriumkern besteht aus einem Neutron und einem Proton, während der gewöhnliche Wasserstoffkern, wie wir wissen, nur ein Proton enthält. Wir dürfen also annehmen, daß wir durch Subtraktion der beiden Meßergebnisse den Streuwert bekommen, den wir beim Beschuß freier Neutronen mit Elektronen erhielten. Die Ergebnisse dieses Experiments stimmen mit denen des ersten insofern überein, als beim Durchgang des Elektrons durch das Neutron kein *elektrischer* Effekt auftritt – es läßt sich keine vom negativen Meson getrennte, im Zentrum

konzentrierte positive Ladung nachweisen. Bei dem Experiment der Elektronenstreuung läßt sich aber auch die Entfernung messen, über die sich die magnetische Struktur des Neutrons erstreckt; diese Entfernung beträgt ungefähr 10^{-13} cm, ein Wert, wie man ihn für die Größe der Mesonenbahn erwartet hatte.

Als Folge dieser Experimente stehen wir hinsichtlich der Neutronenstruktur vor folgender paradoxer Situation: Wir müssen annehmen, daß zwar die negative elektrische Ladung rund um das positive Zentrum keine endliche Ausdehnung besitzt, wohl aber das Gebiet, dem das magnetische Feld entspringt. Die magnetischen Effekte des Neutrons müssen, dessen sind wir sicher, von der Bewegung des Mesons um den Kern herrühren; damit stimmt auch die Tatsache überein, daß sich die magnetische Struktur über die Entfernung von 10^{-13} cm erstreckt, wie wir sie für die Größe einer Mesonenbahn zu erwarten haben. Die positive Ladung aber scheint sich im Kern des Neutrons nicht lokalisieren zu lassen, obgleich das Neutron als Ganzes elektrisch neutral ist! Dieses Neutron, worin ein negatives Meson kreist und ein ausgedehntes magnetisches Feld erzeugt, worin aber die negative Ladung nicht feststellbar vom positiven Zentrum getrennt ist, stellt eines der großen Geheimnisse der modernen Physik dar.

Zwar ist es gefährlich, sich zur Verdeutlichung von subatomaren Teilchen ein einfaches Modell vorzustellen; wir wollen aber wenigstens versuchen anzudeuten, in welcher Richtung die Lösung des Problems zu suchen sein könnte. Möglicherweise ist das Neutron ein Teilchen, bei dem ein *ungeladenes* Zentrum nicht von einem Meson, sondern von mehreren Mesonen umkreist wird, und zwar von einer gleichen Zahl

positiver und negativer Mesonen, so daß die Gesamtladung gleich null ist. Wenn nämlich die positiven und die negativen Mesonen in *entgegengesetzter* Richtung laufen, addieren sich ihre Magnetfelder, obgleich sich die elektrischen Wirkungen aufheben. Natürlich erfordert eine entsprechende Theorie bedeutend mehr Aufwand als diese grobe Schematisierung. Man hat dazu exakte Rechnungen durchzuführen, mit deren Hilfe man feststellt, ob die paarweise Existenz von Mesonen überhaupt möglich und ein derartiges System wirklich stabil ist. Solche Rechnungen können wir hier allerdings nicht durchführen.

Dieses Kapitel zeigt uns, daß das Neutron zwar ein Elementarteilchen in dem Sinn ist, daß es einen der Grundbausteine fast aller Atome darstellt. Dabei ist es aber keineswegs elementar im Sinne von einfach. In der Tat dürfen wir kaum behaupten, auch die allerelementarste Struktur des Neutrons zu kennen. Trotz unserer vielen Wissenslücken können wir jedoch sehr genau und bis in alle Einzelheiten beschreiben, welche Wechselwirkung zwischen Neutronen und Protonen, Atomkernen und Atomen besteht. Bei der Behandlung dieser Wechselwirkungen machen wir praktisch keinen Fehler, wenn wir das Neutron als einfaches, strukturloses Teilchen betrachten – ungeladen, mit bestimmter Masse und mit einer von seiner Energie abhängigen Wellenlänge. In den folgenden Kapiteln werden wir einiges darüber erfahren, wie man das Neutron als wirksames Hilfsmittel bei der Untersuchung der Materie benützt. Dabei wollen wir uns das Neutron wieder als einfaches Teilchen vorstellen. Es ist gut, daß wir das dürfen, denn wie wir sehen konnten, haben wir vom Innern des Neutrons nur sehr vage Vorstellungen.

Fünftes Kapitel

KERNE UND NEUTRONEN

Nach unserem kurzen Blick auf die komplizierte innere Struktur des Neutrons, in dem dauernd Mesonen emittiert und wieder absorbiert werden, wollen wir uns den interessanten Erscheinungen zuwenden, die auftreten, wenn Neutronen auf andere Materie treffen. Bei all diesen vielfältigen Wechselwirkungen mit Kernen, Atomen, Molekülen und Kristallen verhalten sich die Neutronen wie einfache, ungeladene Teilchen von bestimmter Masse, Wellenlänge und Magnetisierung; von der inneren Kompliziertheit ist nichts zu bemerken. Unter den verschiedenen Formen der Materie, mit denen das Neutron in nennenswerte Wechselwirkung tritt, wollen wir uns im Augenblick auf die Atomkerne beschränken. Gerade diese Wechselwirkung mit Kernen zeigte erstmalig die große Bedeutung des Neutrons als physikalisches Hilfsmittel: Mit Hilfe des Neutrons können wir ohne Schwierigkeit in großer Menge Kerne in andere Kerne umwandeln, die ganz andere Eigenschaften haben können. Wenn wir Atomkerne mit Neutronen beschießen, erfahren wir überdies eine ganze Menge über deren Aufbau. Wir wollen einige eindrucksvolle Beispiele betrachten.

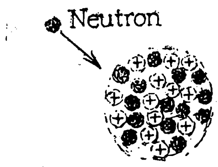
EINFANG LANGSAMER NEUTRONEN

Neutronen dringen ungehindert in Atome ein, weil sie keine elektrische Ladung besitzen. Sie werden von den Elektronen, die den Kern umgeben, kaum beein-

flußt und können daher die Oberfläche des Kerns erreichen. In der Nähe des positiv geladenen Kernes ist das elektrische Feld außerordentlich stark; würden wir das Atom mit einem Proton beschießen, so würde dieses stark abgestoßen und könnte den Kern nur erreichen, wenn es sich sehr rasch bewegt. Auf das Neutron hat dieses außerordentlich starke elektrische Feld aber praktisch keinen Einfluß, so daß es auch bei niedrigster Geschwindigkeit den Kern erreichen kann.

Das Neutron kann entweder an der Oberfläche des Kerns abprallen oder auch in ihn eindringen, von ihm absorbiert werden und seine Absorption auf eindrucksvolle Weise bemerkbar machen. Eine kurze Überlegung wird uns zeigen, wie sich der »Einfang« eines Neutrons manifestiert. Die Aufnahme eines Neutrons in einen Atomkern ändert die chemischen Eigenschaften des Atoms nicht; es entsteht dadurch lediglich ein anderes *Isotop* desselben chemischen Elements. So wird aus gewöhnlichem Aluminium (Al^{27}) nach Absorption eines Neutrons Aluminium 28 (Al^{28}), das eine Einheit schwerer ist, aber gleiche chemische Eigenschaften besitzt. Im Kern jedoch treten sehr große Veränderungen auf: während Al^{27} ganz stabil ist, erweist sich Al^{28} als *radioaktiv* und emittiert ein energiereiches Elektron, einen sogenannten *Beta-Strahl*. Die wichtigen Schritte dieser Kernumwandlung sind in Abbildung 20 skizziert.

Die in Form des schnellen Beta-Strahles abgegebene Energie entsteht aus der bei der Absorption des Neutrons zugefügten Masse. Ein Teil der zusätzlichen Masse verwandelt sich bei der Emission des radioaktiven Teilchens in Energie, und wie wir wissen, bedeutet bereits das Verschwinden von ganz wenig Masse einen großen Energiebetrag. Auf die außer-



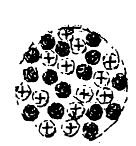
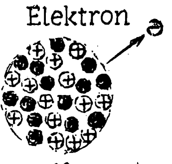



Abb. 20. Hier wird gezeigt, welche Veränderungen im Kern auftreten, wenn stabiles Aluminium (Al^{27}) ein Neutron absorbiert. Es entsteht das instabile Aluminium-Radioisotop Al^{28}, das durch Emission eines Elektrons zerfällt. Dabei bildet sich Silizium (Si^{28}).

ordentliche Bedeutung der beim Neutroneneinfang auftretenden Radioaktivität für Naturwissenschaft, Medizin und Technik werden wir später zu sprechen kommen; im Augenblick soll uns nur die Tatsache interessieren, daß man den Einfang eines Neutrons ganz einfach dadurch feststellen kann, daß der absorbierende Kern hinterher eine Strahlung emittiert.

Die Umwandlung stabiler Atome in radioaktive Isotope mit Hilfe des Neutroneneinfangs ist ein Phänomen von grundlegender Bedeutung, das außerdem leicht zu beobachten ist. Deshalb haben sich schon bald nach der Entdeckung des Neutrons viele Wissenschaftler mit dieser Erscheinung beschäftigt, darunter auch Enrico Fermi, der in Zusammenarbeit mit einer kleinen Gruppe italienischer Physiker eine besonders erstaunliche Eigenschaft des Neutrons entdeckte. Er konnte zeigen, daß sich die Neutronen von den Kernen viel leichter einfangen lassen, wenn man sie erst verlangsamt, indem man sie durch Wasser

oder ein anderes, Wasserstoff enthaltendes Material hindurchschickt. Das erschien zunächst rätselhaft. Bald aber erkannte man darin einen klaren Beweis für eine der fundamentalsten Eigenschaften kleiner Teilchen.

Die erhöhte Wirksamkeit des verlangsamten Neutrons bei Kernreaktionen war ein Zeichen dafür, daß seine Wellenlänge, die, wie wir wissen, gleich seiner Größe ist, mit Abnahme seiner Geschwindigkeit wächst. Die Vermehrung des Neutroneneinfangs bei Verlangsamung der Neutronen war ein entscheidender und besonders dramatischer Beweis dafür, daß sich das Neutron, das als Teilchen entdeckt worden war, auch wie eine Welle verhalten kann. Wenn sich das Neutron langsamer bewegt, wächst seine Wellenlänge; mit anderen Worten, es wird größer. Es ist leicht einzusehen, daß das Neutron um so leichter einen Kern treffen und von ihm absorbiert werden kann, je größer es ist. Abbildung 21 zeigt, daß der Atomkern in Wirklichkeit von einem großen Bereich umgeben ist, innerhalb dessen sich langsame Neutronen einfangen lassen. Dieser Bereich kann im Verhältnis zum wirklichen Volumen des Kerns riesig sein. So bestätigten die frühen Neutronen-Experimente ganz einwandfrei die von der Quantenmechanik vorhergesagten Welleneigenschaften.

Mit Hilfe der Entdeckung, daß man durch Verlangsamung der Neutronen die Wahrscheinlichkeit ihrer Absorption durch Kerne vergrößert, fanden Fermi und seine Mitarbeiter bald heraus, daß sich fast jedes Element durch Beschießen mit Neutronen radioaktiv machen läßt. So erbrachte der Einfang langsamer Neutronen nicht nur den Beweis für die quantenmechanischen Eigenschaften der Teilchen,

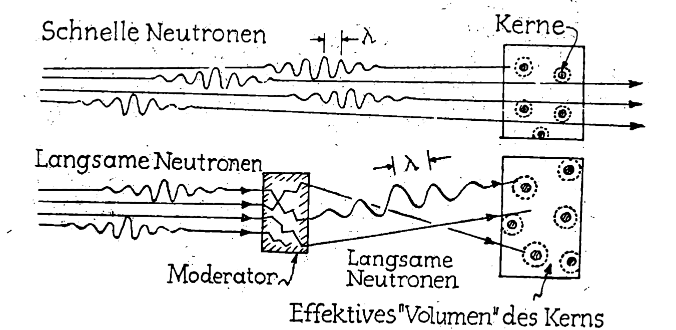


Abb. 21. Der Einfang von Neutronen durch Kerne wird um so wahrscheinlicher, je mehr man die Neutronen verlangsamt. Man vergrößert dadurch ihre Wellenlänge, also ihren »Durchmesser«, und macht somit einen Einfangprozeß möglich, wenn das Neutron in der Nähe eines Kernes vorbeiläuft.

sondern erwies sich auch insofern als besonders wertvoll, als man auf diesem Wege nach Belieben radioaktive Stoffe erzeugen kann. Diese radioaktiven Stoffe oder *Radioisotope* sind jetzt in großen Mengen vorhanden, weil zu ihrer Erzeugung in Kernreaktoren riesige Zahlen von Neutronen verfügbar sind. Sie finden vielerlei Verwendung als wissenschaftliche Hilfsmittel.

RADIOISOTOPE

Mit den riesigen Neutronenintensitäten, die bei der – in einem späteren Kapitel beschriebenen – Kettenreaktion auftreten, lassen sich Isotope in so großen Mengen erzeugen, wie sie in der Anfangszeit der Neutronenphysik unvorstellbar waren. Viele dieser Radioisotope werden zur Zeit in einem riesigen Kernreaktor in Oak Ridge im Staat Tennessee hergestellt,

von wo aus sie in alle Welt versandt werden, in Laboratorien, Krankenhäuser und Industriebetriebe.

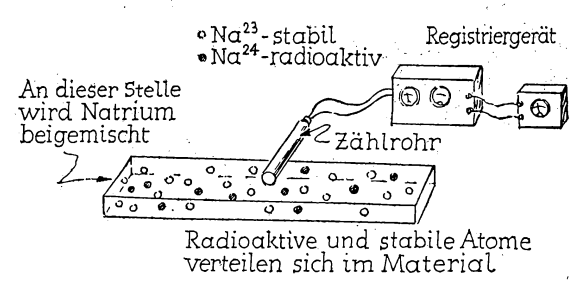


Abb. 22. Mit Neutronen hergestellte Radioisotope sind außerordentlich wertvoll als »Indikator« für viele Vorgänge. Man benützt sie bei wissenschaftlichen Untersuchungen, in der Pflanzenzucht, bei Fertigungsprozessen und in der Medizin. Man beobachtet, welchen Weg der Indikator durch den menschlichen Körper, durch eine Pflanze oder durch die Stufen eines Experiments nimmt. Hier wird am einen Ende des Behälters der Indikator Natrium (Na^{24}), gemischt mit stabilem Natrium (Na^{23}) zugesetzt. Man kann verfolgen, wie sich das Salz in dem Behälter ausbreitet.

Die mannigfaltigen Verwendungsmöglichkeiten der Radioisotope beruhen auf der von ihnen ausgesandten durchdringenden Strahlung, die es erlaubt, ziemlich genau festzustellen, wo sie sich in jedem gegebenen Augenblick befinden. Man benützt die Radioisotope also hauptsächlich als »Indikatoren«. Die Strahlung zerfallender Kerne, die man mit Hilfe von »Zählrohren« feststellt, gibt an, wie in dem untersuchten Material Atome von Radioisotopen verteilt sind: Das geschieht bei chemischen Reaktionen, in lebendem Gewebe oder bei industrieller Produktion. Deutlich und genau zeigt die Strahlung der einzelnen Atome des Indikators den Ort an, wo sie sich gerade befinden, und liefert uns Auskünfte, die uns nach den

alten Methoden versagt blieben. Wir erfahren auf diese Weise, wie Elemente an chemischen Reaktionen teilnehmen, wie Düngemittel durch die Wurzeln einer Pflanze über den Stengel in die Blätter vordringen und wie wichtige Bestandteile der Nahrung vom Körper aufgenommen und in die verschiedenen Gewebe verteilt werden. Unwahrscheinlich geringe Stoffmengen, weniger als ein Milliontel Gramm, kann man durch Prozesse hindurch verfolgen, die mit gewöhnlichen Mitteln überhaupt nicht erforscht werden können. Es gibt kaum ein wissenschaftliches, medizinisches oder technisches Gebiet, in dem sich die Radioisotope nicht als wirksame Indikatoren bewährt hätten.

Auf dem weiten Gebiet der Produktionskontrolle verwendet man die Radioisotope zur Dickenbestimmung von Materialien, zur Feststellung verschiedener Komponenten in chemischen Prozessen und auf diese Weise zur Überwachung schnell ablaufender, kontinuierlicher Herstellungsprozesse. Als Beispiel hierfür zeigt Abbildung 23 eine Anordnung, wie die Dicke von Blech automatisch während des Walzens gemessen und auf den richtigen Wert einreguliert werden kann.

Eine weitere Verwendungsmöglichkeit für Radioisotope – die eindrucksvollste von allen – ist die Behandlung von Krankheiten. Als »Indikator« benützt man Radioisotope nicht nur zur Untersuchung der normalen Funktionen des lebenden Gewebes, sondern auch zur Feststellung von Krankheiten. Darüber hinaus ist es möglich, manche Formen von Krebs durch direkte Anwendung harter Strahlung zu behandeln. Bei ausreichender Intensität ist die Strahlung imstande, viele Zellen abzutöten, so daß man mit ihrer

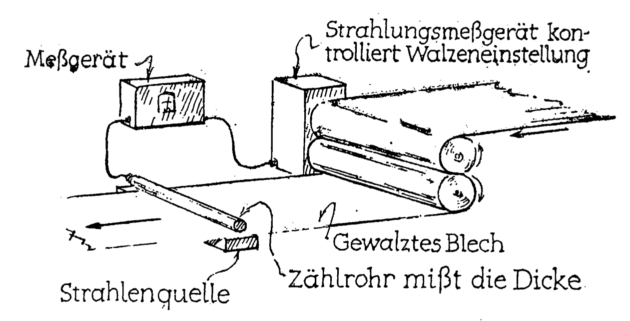


Abb. 23. Die Dicke von Blech läßt sich während des Walzvorgangs mit radioaktiven Meßgeräten kontrollieren. Aus der durch das Blech dringenden Strahlungsintensität erfährt man seine Dicke. Der Meßwert wird automatisch Motoren zugeführt, die den Walzenabstand so einstellen, daß die Dicke des Blechs immer konstant bleibt.

Hilfe die bösartigen Wucherungen der verschiedenen Arten von Krebszellen unter Kontrolle bringen kann. Die Behandlung entspricht genau der seit vielen Jahren mit Radium ausgeübten, nur daß jetzt, da man alle Elemente radioaktiv machen kann, ein viel weiterer Spielraum möglich ist. Abbildung 24 zeigt einen Apparat zur Krebsbehandlung. Radioaktives Kobalt kann man zum Beispiel äußerlich oder innerlich anwenden; bei innerlicher Anwendung werden Kobalt-Drähte oder -Perlen in die vom Krebs befallenen Gewebe eingeführt. Auf diese Weise hat man viel mehr Heilmethoden zur Verfügung, als bei reiner Radiumbehandlung möglich waren.

So erstaunlich die Anwendungsmöglichkeiten der Radioisotope in der reinen Forschung, in der Heilkunde und in der Technik bereits sind, so können wir doch voraussagen, daß sie sich in naher Zukunft in einem heute noch unvorstellbaren Maße ausweiten werden. Auch die hierdurch möglichen finanziellen

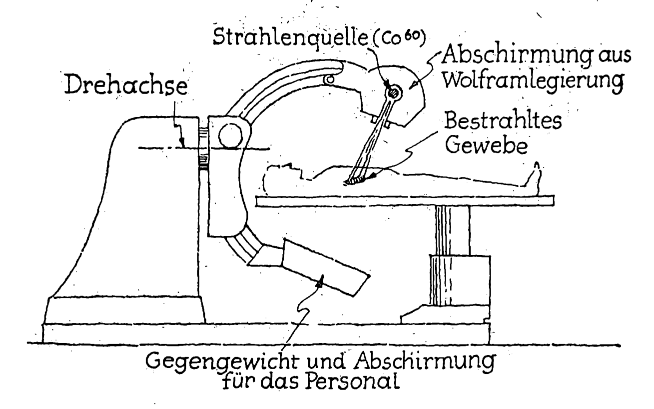


Abb. 24. Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die Behandlung von Krebs mit radioaktiven Elementen. Mit dem oben schematisch abgebildeten Gerät lenkt man die Strahlung von Kobalt auf das zu behandelnde Gewebe. Man läßt den Apparat um den Patienten rotieren, um dem kranken Gewebe eine starke Dosis verabreichen zu können, ohne das gesunde Gewebe sehr zu beschädigen.

Einsparungen sind höchst bemerkenswert; zum Zeitpunkt der Niederschrift dieses Buches wurde eine Schätzung der Atomenergiekommission veröffentlicht, die allein für die alljährlich in der Industrie durch Anwendung von Radioisotopen eingesparten Gelder einen Betrag von über zwei Milliarden Mark nennt. Es ist natürlich unmöglich, die zahllosen naturwissenschaftlichen oder medizinischen Erfolge der Radioisotope nach finanziellen Werten zu bemessen, aber wir dürfen wohl als ziemlich sicher annehmen, daß ihr Beitrag zum Wohlergehen der Menschheit den Nutzen für Industrie und Wirtschaft noch weit in den Schatten stellt.

Da Radioisotope lebende Zellen abtöten können, ist bei ihrer Verwendung größte Vorsicht am Platze.

Glücklicherweise aber sind die modernen Instrumente zur Strahlenmessung außerordentlich empfindlich, und daher genügen als Indikatoren so geringe Mengen von Radioisotopen, daß ihre Strahlung nicht schaden kann. Bei der Strahlenbehandlung von Krankheiten braucht man natürlich viel stärkere Strahlenquellen. Hier muß man besondere Sorgfalt walten lassen, um Patienten und Arzt zu schützen. Bei der Herstellung von Radioisotopen in Reaktoren und bei ihrem Versand an Krankenhäuser und Laboratorien werden stets besondere Vorsichtsmaßregeln beachtet.

Wie wir gesehen haben, erweist sich die interessante Erscheinung des Neutroneneinfangs durch die dabei entstehenden Radioisotope als überaus nützlich; es gibt aber noch eine weitere Anwendungsmöglichkeit, die vielleicht noch faszinierender ist. Der Neutroneneinfang kann uns nämlich nicht nur Auskunft über die Welt des Mikrokosmos geben, sondern auch über ein weit zurückliegendes Ereignis: über die Entstehung der Elemente selbst.

WIE DIE ELEMENTE ENTSTANDEN SIND

Wenn auch die Entstehung des Universums und die Bildung der Elemente schon einige Milliarden Jahre zurückliegen, so hängen die eben betrachteten Erscheinungen doch damit zusammen. Aus den Beobachtungen über den Einfang von Neutronen durch Kerne konnten Wissenschaftler einen entscheidenden Hinweis für die Lösung des Rätsels von der Entstehung des Universums gewinnen – und damit für eines der grundlegendsten Probleme physikalischer Forschung überhaupt.

Vorgänge zu erklären, die vor so langer Zeit geschehen sind, ist schwer. Nicht nur ist jede Erinnerung an solche Ereignisse lange vor Eintritt des Menschen in die sogenannte geschichtliche Zeit verlorengegangen, sondern es ist auch praktisch unmöglich, unsere theoretischen Schlüsse durch das Experiment zu bestätigen. Die einzigen Beweismöglichkeiten liegen bei diesem Forschungszweig in dem Tatsachenmaterial, das im Weltall heute noch vorhanden ist. Wir müssen natürlich annehmen, daß bei der Entstehung des Weltalls alle heute bekannten physikalischen Gesetze schon gültig waren. An Hand dieses Tatsachenmaterials entwickelte der Physiker George Gamow zusammen mit seinen Mitarbeitern für die Entstehung der Elemente die »Theorie des Neutroneneinfangs«.

Die Wissenschaftler gingen von der Tatsache aus, daß in unserem Weltall einige chemische Elemente relativ häufig vorkommen. Diese relative Häufigkeit ist nicht nur für die Erde, sondern auch für andere Teile des Weltalls bekannt. Informationen über entfernte Gebiete kann man einmal aus den Meteoriten gewinnen, die aus dem Weltraum auf die Erde treffen, und zum zweiten aus dem Licht, das die fernen Sterne ausstrahlen. Aus diesen Untersuchungen wissen wir, daß im gesamten Universum die leichten Elemente, wie Wasserstoff, Helium und Kohlenstoff, gegenüber den schwereren Elementen, wie Gold und Blei, vorherrschen.

Der entscheidende Hinweis für die Theorie besteht darin, daß bei den Kernen der einzelnen Elemente die Neigung zum Neutroneneinfang der Häufigkeit ihres Vorkommens gerade umgekehrt proportional ist. Die reichlich vorhandenen leichteren Elemente zeigen wenig Neigung, Neutronen einzufangen, wäh-

rend die weniger häufigen schweren Elemente diese Neigung in hohem Maße aufweisen. In der Tat, wenn wir, wie in Abbildung 25, die Häufigkeit der Elemente graphisch darstellen und das so entstehende Diagramm auf den Kopf stellen, dann erhalten wir genau die graphische Darstellung der Neigung der einzelnen Elemente, Neutronen einzufangen. Abb. 25 oben zeigt dieses zweite Diagramm. Offensichtlich besteht ein enger Zusammenhang zwischen dem Neutroneneinfang und dem Vorgang, der vor langer Zeit die Elemente in ihrer jetzigen Form entstehen ließ.

Aus dieser ins Auge fallenden Wechselbeziehung leiteten Gamow und seine Mitarbeiter die Theorie ab, daß vor einigen Milliarden Jahren das gesamte Weltall nur aus einer Zusammenballung von Neutronen bestand, die sich mit ungeheurer Geschwindigkeit von einem gemeinsamen Entstehungszentrum wegbewegten. (Die Theorie macht keine Aussagen darüber, was in diesem Zentrum geschah, um die Neutronen überhaupt entstehen zu lassen; diese Frage bleibt späteren Forschern überlassen.) Von dieser Annahme ausgehend, berechneten Gamow und seine Mitarbeiter auf Grund der bekannten Werte für die Wahrscheinlichkeit des Neutroneneinfangs der Elemente (wie sie Abbildung 25 zeigt), auf welche Art und Weise sich die Neutronen zu schwereren Gebilden zusammenschlossen. Diese Gebilde hatten anfangs natürlich keine Ähnlichkeit mit den heutigen Atomkernen – sie konnten ja nur Neutronen enthalten. Nun ist aber jeder Kern mit Neutronenüberschuß radioaktiv und geht in eine stabile Form über, indem er einige seiner Neutronen in Protonen umwandelt und dabei Strahlung aussendet. Auf diese Weise nahmen die einzelnen Kerne durch ständigen Neutronen-

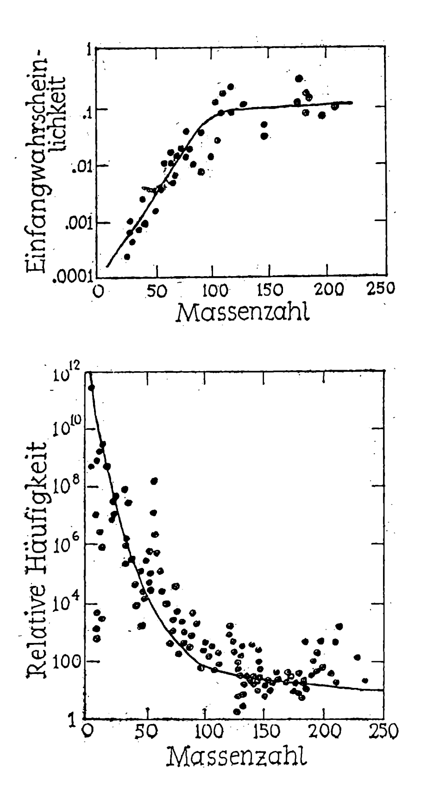


Abb. 25. Die Neigung der Elemente von verschiedenen Massenzahlen, Neutronen einzufangen, ist der Häufigkeit ihres Vorkommens im Universum umgekehrt proportional. Diese Diagramme zeigen die Zusammenhänge. Sehr häufig vorkommende Elemente fangen Neutronen nur ungern ein, seltene Elemente dagegen sehr bereitwillig.

einfang an Größe zu, hielten sich aber durch laufende Ausstrahlung im Gleichgewicht. Das ging so lange, bis die große Mannigfaltigkeit der heute bekannten Kerne entstanden war. Diese Theorie hat etwas wirklich Bestechendes. Sie erlaubt es, aus den meßbaren Eigenschaften der Kerne zu berechnen, wie häufig jedes Element heute vorkommen muß – und die Berechnungen stimmen mit den Tatsachen recht gut überein.

Die von Gamow angenommene Entstehungsweise der Elemente, bei der durch Neutroneneinfang neue Isotope entstehen, besitzt große Ähnlichkeit mit der modernen Herstellung von Radioisotopen in Kernreaktoren. Im Grunde nimmt diese Theorie ja nichts anderes an, als daß die Elemente in einer Art von kosmischem Kernreaktor entstanden, der mit der phantastisch hohen Temperatur von etwa einer Million Grad arbeitete und in dem ungeheure Mengen von Neutronen zur Verfügung standen. Außerdem verlief nach dieser Theorie die ganze Entstehung außerordentlich schnell. Man nimmt an, daß die Expansion der Neutronenzusammenballung, sowie die darauf folgenden Einfangprozesse, bei denen die bekannten Elemente entstanden, nur etwa eine halbe Stunde dauerten.

Natürlich ist eine Bestätigung dieser Theorie nicht möglich, denn man kann ja die Entstehung der Elemente durch Neutroneneinfang in kosmischem Maßstab nicht wiederholen. Auch gibt es einige andere Theorien, nach denen die Entstehung der Elemente nicht schon seit einigen Milliarden Jahren abgeschlossen ist, sondern in allen Milchstraßensystemen noch ständig vor sich geht. Ungeachtet gewisser Einzelheiten klingt aber die Theorie von der Entstehung der

Elemente durch Neutroneneinfang am plausibelsten, und die enge Übereinstimmung zwischen den bekannten Eigenschaften der Kerne und der beobachteten relativen Häufigkeit der Elemente ist doch ein gewichtiges Argument, das unbedingt zu ihren Gunsten spricht.

So ist also die Entstehung der Welt ein weiteres Beispiel – diesmal von kosmischem Ausmaß – für die Fingerzeige, die uns das Neutron zum Verständnis unserer Welt liefert. Wir wollen jetzt aber in den Bereich des Subatomaren zurückkehren und nicht mehr die Eigenschaften des Weltalls betrachten, sondern die einer Miniaturwelt, nämlich des Atomkerns, so wie sie das Neutron uns zeigt.

DIE KUGEL AUS MILCHGLAS

Als Neutronen für eine ständig wachsende Zahl physikalischer Laboratorien verfügbar wurden, und besonders seit man sie in Kernreaktoren in großen Mengen erzeugen kann, verwendete man sie immer häufiger für elementare Untersuchungen. Eine Untersuchungsmethode mit besonders erstaunlichen Ergebnissen bestand darin, Neutronenstrahlen zur Erforschung der genauen Kernstruktur zu verwenden. Wie wir wissen, wird die Wellenlänge der Neutronen mit sinkender Geschwindigkeit immer größer, und die Wahrscheinlichkeit, daß sie mit einem bestimmten Kern in Wechselwirkung treten, steigt an. Natürlich dürfen wir andererseits nicht erwarten, Größe und Form eines winzigen Kernes erforschen zu können, wenn wir ihn mit einem Neutron beschießen, das viel größer ist als der Kern selbst. Wenn wir über die Struktur der Kerne Genaueres erfahren wollen, müs-

sen wir also schnelle, d. h. kleine Neutronen, verwenden.

Bis vor wenigen Jahren sah man es für erwiesen an, daß der Kern außerordentlich dicht und vollkommen undurchdringlich ist, und zwar deshalb, weil er auf kleinstem Raum fast die gesamte Masse des Atoms vereinigt. In der Tat, wenn wir uns daran erinnern, daß die Kerne etwa 10000mal kleiner als die Atome sind, so erkennen wir, daß die Dichte im Kern ungefähr 10000^3 oder 10^{12}mal so groß sein muß wie die Dichte gewöhnlicher Materie. Daher hatte man zuversichtlich prophezeit, auch ein schnelles Neutron mit einer viel kleineren Wellenlänge als der Kerndurchmesser könne auf keinen Fall den Kern durchdringen, sondern müsse absorbiert werden.

So war man sehr erstaunt, als man vor wenigen Jahren feststellte, daß in einen Kern eintretende Neutronen durchaus nicht immer absorbiert werden, ja daß sie sogar eine recht gute Chance haben, den Kern vollkommen zu durchlaufen und unversehrt wieder aufzutauchen. Experimente haben eindeutig gezeigt, daß in einigen Fällen das Neutron – mit dem Verhalten einer Welle – in den Kern ein- und wieder austritt, ohne die Teilchen des Kerns zu verändern. Diese Entdeckungen führen zu dem Schluß, daß der Kern trotz seiner enormen Dichte gegenüber Neutronenwellen wenigstens teilweise durchlässig ist.

Dieses erstaunliche Verhalten eines schnellen Neutrons gegenüber der Kernmaterie läßt sich kaum begreifen, wenn man es als Zusammenstoß eines Teilchens mit einem Teilchenklumpen erklären will; wohl aber findet es einen Parallelfall in der bekannten Erscheinung, daß Licht einen durchsichtigen Körper, etwa einen Glasblock, durchdringt. Unter Verwendung

der altvertrauten Theorie der Lichtfortpflanzung ist es möglich, das Verhalten des Neutrons vorherzusagen. Bei den Berechnungen nimmt man an, daß das Neutron nach den für Licht geltenden Gesetzen in den Kern hineingebrochen wird. Wie wir im dritten Kapitel sahen, lassen sich diese Vorhersagen tatsächlich experimentell bestätigen, so daß der Kern also notwendigerweise für einfallende Neutronen durchlässig sein muß. Da aber *einige* Neutronen beim Durchgang durch den Kern absorbiert werden, darf man ihn nicht mit klarem Glas vergleichen, sondern nur mit Glas, das Licht teilweise absorbiert, das heißt mit Milchglas. Diese Eigenschaft drückt man gewöhnlich in der Weise aus, daß man sagt, der Kern sei in gewissem Sinn »eine Kugel aus Milchglas«.

Diese Situation ist ein gutes Beispiel dafür, in welcher Art und Weise die Wissenschaft ihre Fortschritte erzielt. Wenn wir sagen, der Kern sei »in gewissem Sinn« eine Kugel aus Milchglas, so wollen wir damit in keiner Weise den Eindruck erwecken, der Kern bestünde wirklich aus Milchglas. Vielmehr meinen wir damit nur, daß wegen einiger grundlegenden Ähnlichkeiten die Eigenschaften des Kerns denen von Milchglas stark gleichen. Es erweist sich als fruchtbar, die beiden Situationen so zu behandeln, als seien sie identisch; wir benützen einfach die wohlbekannten Gesetze der Lichtausbreitung dazu, das Verhalten des Neutrons im Kern zu beschreiben, von dem wir kaum etwas wissen. Die erzielten Ergebnisse entsprechen erstaunlich genau den Tatsachen, obgleich natürlich der Kern nicht aus Glas besteht und die Neutronen kein Licht sind. Vergleicht man allerdings Theorie und Experiment mit *äußerster* Sorgfalt, so findet man, daß sie sich nicht bis in alle

Einzelheiten entsprechen. Dennoch ist ein solches Kernmodell zur Berechnung des Verhaltens der Neutronen sehr nützlich. Da wir vom wirklichen Aufbau des Kerns nur wenig Ahnung haben, wäre es ohne die Hilfe eines solchen Modells überhaupt unmöglich, Vorhersagen irgendwelcher Art zu machen. Gerade die Unzulänglichkeiten des Modells, die beim Vergleich mit sehr verfeinerten Experimenten zutage treten, erlauben es uns, etwas besseres zu finden – ein verbessertes Modell, das der Wirklichkeit näherkommt.

Im Augenblick hat sich die Grundauffassung des Kerns als »Kugel aus Milchglas« weitgehend durchgesetzt; die Einzelheiten dieses Bildes werden aber laufend modifiziert, um immer bessere Übereinstimmung mit neuen experimentellen Erkenntnissen zu erreichen. So besteht zum Beispiel eines der momentanen Probleme darin, in dem Modell die Tatsache zu berücksichtigen, daß der Kern keine wirkliche Kugelform besitzt, sondern etwas elliptisch ist. Dadurch wird zwar die Berechnung der bei einem Versuch zu erwartenden Ergebnisse komplizierter, die theoretischen Vorhersagen stimmen aber dann besser mit den experimentellen Ergebnissen überein.

Wir sehen also, daß die subatomare Welt noch eine weitere merkwürdige Erscheinung aufweist, die mit unserem gesunden Menschenverstand und unserer Alltagserfahrung kaum in Einklang zu bringen ist. Wie kann ein Neutron unbehindert durch einen Kern hindurchlaufen, dessen Dichte eine Billion mal größer ist als die gewöhnlicher Materie, wieso wird es von den dicht bei dicht sitzenden Neutronen und Protonen nicht sofort abgestoppt? Den allerletzten Grund für die Durchlässigkeit des Kerns kennen wir

noch nicht. Im Augenblick sind die Physiker der Ansicht, daß die Teilchen des Kerns gewissen Gesetzen der Quantenmechanik unterworfen sind, die dem einlaufenden Neutron einen Platz in ihrer Mitte verbieten. So seltsam es klingen mag: es reagiert darauf, indem es durch sie hindurchläuft, als ob sie gar nicht existierten!

Wenn wir auch über die Anordnung der subatomaren Teilchen im Kern und über die Gesetze, die sie beherrschen, noch viel lernen müssen, so ist der Fortschritt auf diesem Forschungsgebiet doch sehr bemerkenswert, nicht nur in der Entwicklung von Modellen, sondern auch bei der Entdeckung der wahren Natur jener Kräfte, die dem Verhalten aller Bewohner dieser Welt des sehr Kleinen zugrunde liegen. Die Neutronen sind aber als Hilfsmittel für die Untersuchung der Materie keineswegs auf den Kern beschränkt. Zum Studium der atomaren Eigenschaften von festen Körpern und von Flüssigkeiten sind sie ebenso geeignet. Beispiele derartiger Untersuchungen werden uns in den nächsten beiden Kapiteln beschäftigen.

Sechstes Kapitel

KRISTALLGITTER

Wir haben jetzt einige der vielen Arbeitsgebiete behandelt, auf denen sich die Wechselwirkung der Neutronen mit Atomkernen als für die Forschung wertvoll erweist. Wir kennen jetzt manche Eigenschaften der Kerne und wissen, wie die Elemente vor Milliarden von Jahren entstanden sind. Außerdem haben wir dank der Kettenreaktion große Mengen der verschiedenartigsten Radioisotope zur Verfügung. All dies können die Neutronen deshalb bewirken, weil sie ungehindert von elektrischen Kräften in Atomkerne einzudringen vermögen. Jetzt wollen wir uns mit einem ganz anderen Arbeitsgebiet befassen, auf dem sich die Neutronen als ebenso nutzbringend erweisen. Wenden wir uns von der Struktur der Kerne ab und betrachten wir einmal viel größere Objekte; diese Objekte sind allerdings im Vergleich zu den Gegenständen des Alltags immer noch sehr klein – kurz gesagt, wir wollen die *Atome* und ihre Eigenschaften ansehen.

Wir ändern damit den Maßstab gewaltig. Ein Atom – und sein Abstand zu anderen Atomen – ist etwa zehntausendmal größer als der Kern. Die Verschiedenheit liegt aber nicht nur in den Längenabmessungen. Die Kräfte, mit denen die Atome in festen Körpern, Flüssigkeiten und Gasen aufeinander wirken, sind von ganz anderer Art als die Kräfte zwischen Protonen und Neutronen im Kern. Während die Kernkräfte noch ein großes Rätsel darstellen und man nur weiß, daß sie etwas mit Mesonen

zu tun haben, weiß man, daß die Kräfte zwischen den Atomen die wohlbekannten elektrischen Wirkungen der Elektronen sind. Aber trotz der Größenunterschiede und der Verschiedenheit der Kräfte sind die Neutronen ebenso nützlich, um die Beziehungen der Atome untereinander zu untersuchen, wie sie zur Untersuchung der Kerne nützlich sind.

Die Hauptaufgabe der Neutronen bei der Untersuchung der Wechselwirkung zwischen den Atomen ist es, die Anordnung der Atome festzustellen, und zwar in den verschiedensten Stoffen, in dichten Metallen und in flüchtigen Gasen. Das Studium des Aufbaus dieser Stoffe und seiner Beziehung zu physikalischen Eigenschaften bildet ein sich schnell erweiterndes Arbeitsgebiet, die sogenannte »Festkörperphysik«, die sich trotz ihres Namens nicht nur mit festen Körpern befaßt, sondern mit den Atomen aller Materie. Wegen der vielen Formen der Materie ist dieses Gebiet sehr weit verzweigt. Es besitzt großen praktischen Wert, denn die Festkörperphysik findet in vielen Industriezweigen Anwendung, vom Maschinenbau bis zur Transistorproduktion.

Es gibt zwei generelle Methoden, wie man mit Neutronen die Anordnung und die Eigenschaften der Atome in den Materialien untersuchen kann. Die eine Methode besteht darin, das Material mit schnellen Neutronen zu beschießen und die Folgen zu beobachten. Atome werden aus ihrem normalen Gitterplatz herausgeschlagen, und verschiedene Eigenschaften ändern sich. Bei der zweiten Methode verwendet man langsame Neutronen. Aus der Art ihrer Streuung kann man die Anordnung der Atome innerhalb der Materie erkennen, ohne sie zu verändern. Wir wollen die Bedeutung der hochinteressanten

Anordnung der Atome in Kristallgittern kurz erklären und dann einige Beispiele für beide Untersuchungsmethoden betrachten.

PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN UND KRISTALLGITTER

Erstaunliche Verschiedenheiten in den physikalischen Eigenschaften der Materie ergeben sich allein schon aus der Art und Weise, wie die Atome angeordnet sind. Das Gas Sauerstoff zum Beispiel (Abbildung 26) besteht aus paarweise zu sogenannten

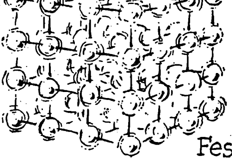
2 Sauerstoffatome pro Molekül

Sauerstoff-atome

Wasserstoff-atome

Gas: Sauerstoff

Flüssigkeit: Wasser



Fester Kristall

Abb. 26. Ordnung und Unordnung in der Natur werden vom atomaren Aufbau der Materie in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen demonstriert. Die geringste Ordnung finden wir in Gasen, die stärkste in festen Kristallen.

ten *Molekülen* zusammengesetzten Sauerstoffatomen (O_2), von denen jedes Paar durch elektrische Kräfte fest zusammengehalten, aber von allen anderen Sauerstoffmolekülen des Gases fast überhaupt nicht

beeinflußt wird. Ebenso besteht das Gas Wasserstoff aus Molekülen, von denen jedes zwei Wasserstoffatome (H_2) enthält. Auch eine Mischung aus Wasserstoff- und Sauerstoffmolekülen ist gasförmig, und ihre Moleküle beeinflussen sich nur wenig. Entzündet man aber dieses Gemisch, so läuft mit großer Geschwindigkeit eine chemische Reaktion ab; Wasserstoff- und Sauerstoffatome verbinden sich miteinander und bilden die Flüssigkeit Wasser, die aus Molekülen der Form H_2O besteht.

Diese gewaltige Verschiedenheit in den physikalischen Eigenschaften – unsichtbares Gas und flüssiges Wasser – resultiert aus der Anordnung der Atome; die Atome selbst bleiben bei der Bildung von Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff vollkommen unverändert. Aber auch das Gas Sauerstoff läßt sich verflüssigen, wenn man es nur genügend abkühlt; dieser flüssige Sauerstoff, der ganz ähnlich aussieht wie Wasser, unterscheidet sich vom Sauerstoffgas nur dadurch, daß in ihm die Moleküle enger beisammensitzen und dadurch starke Kräfte aufeinander ausüben. Bei der Umwandlung von Wasser in Eis oder von flüssigem Blei in festes Blei verändert sich wieder die atomare Anordnung, und zwar so, daß die Atome durch ihre elektrischen Kräfte stärker zusammengehalten werden.

In einem Gas sind die Moleküle kaum geordnet. Sie bewegen sich beliebig im Raum, in so weiter Entfernung voneinander, daß sie kaum aufeinander wirken. In Flüssigkeiten, wie etwa Wasser, ist die Ordnung unter den Molekülen größer, wenn auch keine so vollkommene Gitteranordnung, wie wir sie in praktisch allen Festkörpern finden. Im Wasser sitzen die H_2O-Moleküle dicht beisammen, ja sie

berühren sich, können aber trotz der vorhandenen starken Kräfte frei aneinander vorbeigleiten (vergleiche Abbildung 26). Im festen Körper jedoch ist die atomare Gitteranordnung vollkommen regelmäßig, die Atome können höchstens um einen festen Platz schwingen. Diese genau bestimmte atomare Ordnung kennen wir als *Kristall.* Ein Kristall ist also eine Bauweise der Materie, bei welcher die Atome dadurch, daß sie eine vollkommen regelmäßige Anordnung bilden, die typischen Eigenschaften eines festen Körpers, nämlich Härte und Elastizität, bewirken.

Auch wenn wir nur feste Körper betrachten, finden wir einen weitgehenden Einfluß des Atomgitters auf die physikalischen Eigenschaften. Eines der eindrucksvollsten Beispiele ist der Fall von Diamant und Graphit, die beide aus Kohlenstoffatomen bestehen und sich nur durch ihre Gitteranordnung unterscheiden (siehe Abbildung 27). Bei dem Gitter des Diamants sitzen die Kohlenstoffatome besonders dicht beisammen, so dicht, daß man das mit künst-

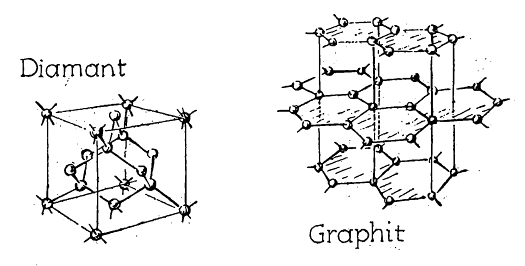


Abb. 27. Diamant und Graphit bestehen beide aus Kohlenstoffatomen und unterscheiden sich nur durch das Kristallgitter. Die eindrucksvollen Unterschiede in ihren Eigenschaften rühren nur von der verschiedenen Gitteranordnung her.

lichen Mitteln kaum erreichen kann. Vor noch gar nicht langer Zeit ist es endlich gelungen, Kohlenstoffatome so dicht zusammenzupressen, daß künstliche Diamanten entstanden, allerdings nur ganz kleine.

Beispiele für die Abhängigkeit der physikalischen Eigenschaften vom Kristallgitter von der Art des eben erwähnten sind augenfällig. Viele andere Eigenschaften aber, die ebenfalls eng von der Atomanordnung abhängen, sind nicht so augenscheinlich, aber von ebenso großer praktischer Bedeutung. Ein Beispiel dafür ist die Härte der Metalle: Sie hängt direkt von der Art und Weise ab, wie die Atome im Metall zu kleinen Kristallen zusammengefügt sind. Eingehende Untersuchungen über diese Gitteranordnungen und ihre Auswirkungen haben zu Verbesserungen der Härte und Korrosionsfestigkeit der Metalle geführt.

In gewöhnlichen Festkörpern – zum Beispiel Eisen – erstreckt sich das Gitter nicht über den ganzen Körper, sondern immer nur über kleine Bereiche. Mit anderen Worten: Diese kleinen Bereiche sind lauter einzelne Kristalle, und das große Stück Eisen ist aus einer Vielzahl von ihnen zusammengesetzt. Die effektive Größe der Kristallite und ihre Anordnung zueinander haben entscheidenden Einfluß auf die physikalischen Eigenschaften des Eisens, auf seine Härte und sein elektrisches und magnetisches Verhalten. Weicheisen besteht aus großen Kristallen, und beim Härtungsprozeß, etwa beim Schmieden, zerbricht man die großen Kristalle in lauter kleine. Auch die magnetischen Eigenschaften des Eisens sind mit der Größe und der Orientierung der einzelnen Kristalle eng verknüpft. Daher erweist sich die Kristalluntersuchung als nützlich für die Entwicklung

von Magneteisen, das man zur Herstellung von Elektromotoren, Transformatoren und anderen elektrischen Geräten verwendet.

Die Abhängigkeit der physikalischen Eigenschaften vom Kristallgitter ist also aus zweierlei Gründen wichtig: Einmal, weil es möglich ist, die Gitteranordnung so zu ändern, daß das Material bestimmte Eigenschaften erhält; zweitens, weil man bei der Untersuchung der Kristallgitter Informationen über den Aufbau der Materie erhält, Informationen, die man um ihrer selbst willen und nicht aus besonderen Absichten heraus gewinnen möchte. Bei vielen Untersuchungen ist schwer festzustellen, welches Ziel denn eigentlich angestrebt wird, weil sich die Methoden so nahe kommen. Wie so oft in der Naturwissenschaft, erkennen wir auch hier wieder die enge Beziehung zwischen Grundlagenforschung und praktischer Anwendung.

WIE SCHNELLE NEUTRONEN KRISTALLE VERÄNDERN

Wenn wir Kristallgitter verändern wollen, um die Auswirkung der Gitterstruktur auf physikalische Eigenschaften zu studieren, sind schnelle Neutronen das wirksamste Hilfsmittel zur Veränderung der Materialeigenschaften. Langsame Neutronen, so nützlich sie zur Untersuchung der Kristallgitter sein mögen, können kaum Änderungen im Gitter hervorrufen. Schnelle Neutronen aber stoßen bei ihrer Bewegung durch den festen Kristall mit Atomen zusammen und schlagen sie aus ihrem normalen Platz heraus. Eine derartige Verrückung von Atomen, auch wenn es nur ein kleiner Bruchteil der Gesamtzahl ist,

kann die wichtigsten Eigenschaften des Kristalls verändern, etwa seine Härte und seine Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität. Neutronenbeschuß verändert diese Eigenschaften merklich.

Ein Kristall enthält eine so ungeheure Anzahl von Atomen, daß, wenn auch nur ein sehr kleiner Prozentsatz von ihnen verschoben werden soll, eine sehr große Menge schneller Neutronen aufgewandt werden muß. Eine der wirksamsten Methoden, um viele schnelle Neutronen in ein Material zu bringen, besteht darin, die betreffende Probe in den Mittelpunkt eines Kernreaktors zu legen, möglichst in die Nähe eines Uranstabes. Bei diesem Verfahren treten große Schwierigkeiten auf, denn man muß die Neutronen daran hindern, auf ihre Plätze im Kristallgitter zurückzuwandern. Wenn die Materialprobe sehr heiß ist, bewegen sich die Atome sehr schnell und finden bald an ihren ursprünglichen Platz zurück. Um die von den Neutronen hervorgerufenen Veränderungen zu konservieren, ist es gewöhnlich notwendig, die Probe während und nach der Neutronenbestrahlung auf sehr tiefer Temperatur zu halten. Da die Wärmeentwicklung im Mittelpunkt eines Kernreaktors sehr groß ist, fällt die Kühlung der Probe schwer; es konnten aber verschiedene Methoden dafür entwickelt werden. Bei einer Methode pumpt man zum Beispiel ununterbrochen flüssige Luft durch den Reaktor, so daß die in der Materialprobe entwickelte große Wärme laufend abgeführt wird.

Jetzt, wo die experimentellen Schwierigkeiten überwunden sind, erzielen die Wissenschaftler viele interessante und wichtige Ergebnisse. Zum Beispiel wurde entdeckt, daß ein Metall durch Neutronenbeschuß wirklich härter wird. Diese *Strahlungshärtung* ent-

spricht ziemlich genau der bekannten mechanischen Härtung, die man durch heftige mechanische Verformung des Metalls hervorruft, indem man es etwa mit einem schweren Hammer schmiedet. Da die Neutronen nur einzelne Atome verschieben, während durch mechanische Deformation größere Teile des Metalls als ganzes verschoben werden (Abbildung 28), hatte

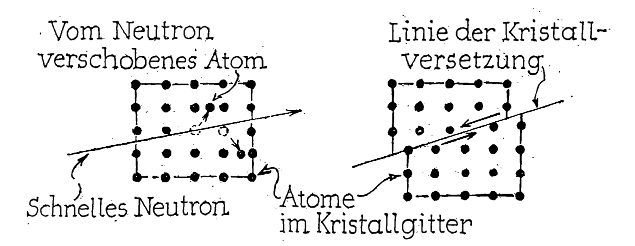


Abb. 28. Schnelle Neutronen zerstören das Kristallgitter. Ihre Wirkung wird in dieser Abbildung damit verglichen, was im Innern eines Metalles geschieht, wenn man es »mechanisch härtet«, das heißt, hämmert oder biegt. Neutronenbeschuß und Schmieden rufen eine ähnliche Veränderung der Metalleigenschaften hervor.

man nicht erwartet, daß beide Vorgänge die Härte des Metalls um fast genau den gleichen Betrag erhöhen. Wie wir gehört haben, läßt die große Geschwindigkeit bei hohen Temperaturen die Atome leicht auf ihre Plätze im Gitter zurückkehren. Man kann daher die durch den Neutronenbeschuß bewirkte Änderung der Metalleigenschaften oft rückgängig machen, wenn man das Metall auf hohe Temperatur erhitzt und dann langsam abkühlen läßt. So läßt sich ein strahlungsgehärtetes Metall genau wie ein mechanisch gehärtetes durch Erhitzen erweichen – ein Vorgang, den man als *Tempern* kennt.

Schon aus diesen wenigen Beispielen wird ersichtlich, daß man durch Beschuß mit schnellen Neutronen nicht nur grundlegende theoretische Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen Kristallstruktur und äußerlichen physikalischen Eigenschaften eines Stoffes gewinnt, sondern daß man den Neutronenbeschuß auch vielseitig praktisch anwenden kann. Versuchsergebnisse, wie etwa die eben beschriebenen, lassen uns die komplizierten industriellen Herstellungsprozesse der verschiedenen Metalle besser verstehen. Diese Prozesse, die in mancher Hinsicht mehr Kunst als Wissenschaft sind, wurden im Lauf vieler Jahre in reiner Probiertechnik entwickelt, und sogar heute verstehen wir noch nicht alle inneren Vorgänge, die für den Erfolg dieser Methoden verantwortlich sind. Wenn die Untersuchung durch Neutronenbeschuß die Natur dieser Mechanismen aufklärt, können die Methoden zur Herstellung spezieller Metallsorten sehr verbessert werden.

NEUTRONENBEUGUNG

Wollen wir die Anordnung der Atome in einem Kristall ohne Zerstörung des Kristallgitters untersuchen, so müssen wir ganz langsame Neutronen verwenden. Wie man, um die Form der Kerne zu bestimmen, Neutronen benötigt, deren Wellenlänge von etwa gleicher Größenordnung ist, so ist es am günstigsten, zur Untersuchung von Kristallgittern Neutronen zu verwenden, deren Wellenlänge dem Abstand der Atome entspricht. Bei Neutronen dieser Geschwindigkeit ist die Art und Weise, wie sie durch das Kristallgitter laufen, besonders stark von der genauen Anordnung der Atome abhängig; daher

machen sie über das Kristallgitter genauere Aussagen als Neutronen von kleinerer oder größerer Wellenlänge. Diese Methode der Gitteruntersuchung läßt sich erst ernsthaft verwirklichen, seit die Kettenreaktion zur Verfügung steht, denn nur mit Hilfe der enormen Mengen von langsamen Neutronen, die im Kernreaktor entstehen, kann man Kristallgitter genau untersuchen. Mit der immer weiter steigenden Zahl von Leistungsreaktoren wurde dieses Arbeitsgebiet zu einem besonders wichtigen Zweig der Neutronenforschung. Es wird sich für uns lohnen, die Grundlagen dieser Methode kurz zu betrachten, denn sie zeigt uns ganz klar, daß die Welleneigenschaften der Neutronen für die Forschung ein ausgezeichnetes Hilfsmittel darstellen.

Ein Kernreaktor liefert viel mehr langsame als schnelle Neutronen. Wir wollen zwar die einfachen Grundlagen der Kettenreaktion erst etwas später betrachten, können aber dennoch schon jetzt leicht einsehen, wieso in den Reaktoren langsame Neutronen so häufig sind. Die Atome aller Arten von Materie sind in ständiger Bewegung und schwingen hin und her, wobei ihre Energie die Wärmeenergie des Stoffes darstellt. (Sogar diese Wärmeschwingungen der Atome werden mit Neutronen gemessen, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden.) Die in einem Reaktor der üblichen Bauweise erzeugten Neutronen verlieren bei jedem Zusammenstoß mit einem Atom einen Teil ihrer Energie und haben schließlich dieselbe Energie wie die Wärmeschwingungen der Reaktoratome, nämlich etwa 0,01 Elektronenvolt. Ein weiterer Energieverlust tritt im Durchschnitt nicht ein; diese Neutronen sammeln sich in großer Anzahl im Reaktor an. Der bedeutende Nutzwert der Kern-

reaktoren für die Neutronenbeugung ergibt sich aus der glücklichen Tatsache, daß diese langsamen Neutronen – entsprechend der Formel im dritten Kapitel – eine Wellenlänge besitzen, die etwa genau so groß ist wie der Abstand zwischen den Atomen, nämlich etwa 10^{-8} cm, also ein Hundertmillionstel Zentimeter.

Die Untersuchung einer Gitterstruktur geht nun so vor sich, daß man einen langsamen Neutronenstrahl auf einen Kristall richtet, wie wir in Abbildung 29 sehen, und dann mißt, in welche Richtungen

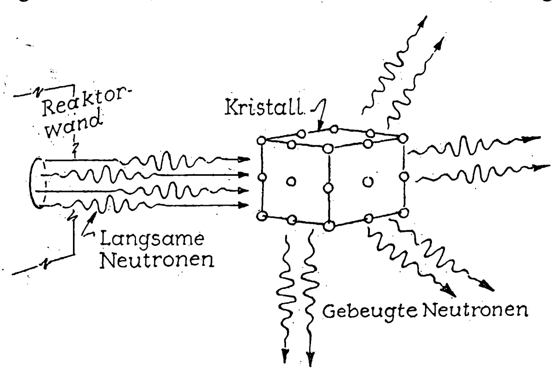


Abb. 29. Die Neutronenbeugung enthüllt viele Einzelheiten der Kristallstruktur. Die Gitteranordnung eines Kristalles läßt sich aus der Richtungsverteilung bestimmen, nach der die Neutronen gestreut werden.

die Neutronen von der Materialprobe gestreut werden. Die Anzahl der gestreuten Neutronen hängt in äußerst komplizierter Weise von der Richtung ab: in gewisse Richtungen laufen fast gar keine, in andere sehr viele Neutronen. Wegen bestimmter Relationen zwischen Atomanordnung und Neutronen-Wellenlänge summieren sich die von allen Atomen gestreuten Neutronenwellen in gewissen Winkelbereichen.

Diese Summierung in ganz spezifischen Richtungen ist eine typische Welleneigenschaft, die man bei gewöhnlichem Licht *»Beugung«* nennt. Analog dazu bezeichnet man das Verhalten der Neutronen als *»Neutronenbeugung«*. Hauptsächlich wegen der notwendigen starken Abschirmung sind Neutronenbeugungs-Apparaturen sperriger als Geräte zur Untersuchung der Lichtbeugung.

Die komplizierten Beugungsbilder von Kristallen, die man mit Hilfe der Neutronen erhält, ähneln sehr stark den Beugungsbildern, die mit Röntgenstrahlen entstehen. Sowohl Neutronen als auch Röntgenstrahlen werden in gewisse Richtungen stark gestreut, aber schon bei ganz nahe benachbarten Winkeln kann die Streuung praktisch gleich null sein. Seit vielen Jahren wird die Röntgenbeugung zur Untersuchung von Kristallgittern verwendet; jetzt kann man die Struktur der Materie nach denselben Prinzipien auch mit Neutronen untersuchen. Falls sich die Neutronen vollkommen wie die Röntgenstrahlen verhielten, hätte es natürlich wenig Zweck, sie zu verwenden. Mit Röntgenstrahlen kann man die Kristallstruktur außerordentlich genau bestimmen, und bei aller Stärke der Leistungsreaktoren sind die verfügbaren Neutronenintensitäten doch noch weit geringer als die der in modernen Röntgenanlagen erzeugten Strahlen. Nun verhalten sich Neutronen aber *etwas* anders als Röntgenstrahlen, und die Unterschiede sind von großer Bedeutung. Wir werden uns jetzt die beiden Hauptanwendungsgebiete der Neutronenbeugung ansehen – Untersuchung der Wasserstoffatome und der magnetischen Atome. Hierbei versagen nämlich die Röntgenstrahlen, im Gegensatz zu den Neutronen.

DIE FESTSTELLUNG VON WASSERSTOFFATOMEN

Die meisten Stoffe, die keinen Wasserstoff enthalten (zum Beispiel Natriumchlorid, also Kochsalz), sind mit Hilfe der Röntgenstreuung und Röntgenbeugung bereits eingehend untersucht worden. Es gibt jedoch viele interessante Stoffe, die Wasserstoff enthalten, und einige von ihnen sind recht kompliziert. Aber schon die Bauweise der einfachsten unter ihnen, wie von ganz gewöhnlichem Eis, ist nur schwer festzustellen. Der Grund, warum wir über Wasserstoff so wenig wissen, besteht darin, daß Wasserstoff nur ein Elektron enthält und deshalb Röntgenstrahlen nicht merklich streut. Im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen werden aber die Neutronen mehr am Kern eines Atoms als an seinen Elektronen gestreut, so daß ein Atom mit nur wenigen Elektronen nicht etwa auch die Neutronen schlecht streuen müßte. Die Stärke der Kernstreuung hängt außer von der Größe des Kerns noch von vielerlei Dingen ab, vor allem von dem Verhältnis zwischen der Neutronenenergie und der Struktur des betreffenden Kernes. So zeigt es sich, daß langsame Neutronen an Wasserstoffatomen ziemlich stark gestreut werden, obgleich der Kern doch aus nur einem Proton besteht. Wasserstoff streut Neutronen zum Beispiel viel stärker als Helium, dessen Kern zwei Protonen und zwei Neutronen enthält. Demzufolge ist es mit Hilfe von Neutronen möglich, die Lage von Wasserstoffatomen festzustellen. Röntgenstrahlen wären dazu praktisch nutzlos.

Die Stoffe, die Wasserstoff enthalten, bilden eine besonders wichtige Gruppe. Unter ihnen sind nicht nur so geläufige Substanzen wie Eis, sondern auch

viele »organische« Verbindungen, wie sie etwa in lebenden Geweben vorkommen. Organische Verbindungen bestehen hauptsächlich aus Wasserstoff-, Kohlenstoff- und Sauerstoffatomen, die zu ganz komplizierten Molekülen zusammengesetzt sind. Einige enthalten Hunderte von Atomen. Im Augenblick müssen wir uns zufrieden geben, wenn wir nur die einfachsten dieser Moleküle analysieren können, weil die verfügbaren Neutronenquellen nicht intensiv genug sind, um die strukturellen Einzelheiten der komplizierteren unter ihnen wiederzugeben. Sobald stärkere Quellen zur Verfügung stehen, dürfte es möglich sein, auch die größeren und komplizierteren Moleküle zu untersuchen und Ergebnisse von äußerster Wichtigkeit für Chemie und Biologie zu erzielen.

MAGNETISCHE ATOME

Neben der verschieden starken Streuung durch Wasserstoffatome ergibt sich ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen der Beugung von Neutronen und von Röntgenstrahlen aus der Tatsache, daß die Neutronen ein magnetisches Feld besitzen. Im vierten Kapitel gab uns das Magnetfeld Aufschluß über die innere Struktur des Neutrons; jetzt wollen wir mit diesem Feld die magnetischen Eigenschaften der Materie erforschen. Neutronen besitzen Ähnlichkeit mit kleinen Magneten und werden daher nicht nur an Atomkernen, sondern auch am Magnetfeld von ganzen Atomen gestreut. Wegen dieser magnetischen Streuung und wegen der Fähigkeit der Neutronen, feste Materie zu durchdringen, kann man sie dazu verwenden, die Natur der magnetischen Felder weit innerhalb von Metallstücken eingehend zu unter-

suchen. Mit den älteren Methoden, die nur das Feld außerhalb des Objektes messen, konnte man derartige Untersuchungen nicht durchführen, da uns diese Felder lediglich erkennen lassen, was *durchschnittlich* im Innern geschieht. Mit Röntgenstrahlen sind magnetische Messungen leider unmöglich; diese Strahlen sind eine elektromagnetische Wellenbewegung wie das Licht und werden nicht von den magnetischen Feldern, sondern nur von den Elektronen der Atome gestreut. Röntgenbeugungsdiagramme zeigen zwar die Anordnung der Atome im Kristallgitter, sagen aber nichts über die *magnetische* Struktur aus. Die Neutronenbeugung dagegen läßt aus ein und derselben Messung sowohl die Anordnung der Atome als auch die magnetische Struktur erkennen.

So werden die Neutronen wegen ihres gleichzeitigen Auftretens als Wellen und als kleine Magnete zu wirksamen Instrumenten für die genaue Untersuchung der Atomanordnung und der magnetischen Felder in wichtigen Stoffen, wie etwa in Eisen. Eisen ist eines der *ferromagnetischen* Metalle, die sehr stark magnetisiert werden können. Seine komplizierten magnetischen Eigenschaften sind mit üblichen Methoden nur schwer zu erfassen. Eine solche Methode besteht zum Beispiel darin, das Magnetfeld zu messen, welches in der Umgebung des betreffenden Metalls herrscht. Derartige Messungen machen keine Aussagen über die außerordentlich bedeutungsvollen Magnetfelder der einzelnen Atome. Mit Hilfe der Neutronenbeugung aber können diese Felder jetzt untersucht werden.

Aber auch mit Neutronen sind diese Experimente keineswegs einfach. In bestimmten Kristallen – zum Beispiel in den vor kurzer Zeit entdeckten *Ferriten* –

kann die Magnetisierung verschiedener Atome in unterschiedliche Richtung zeigen und kann verschieden stark sein. Gewöhnliche magnetische Stoffe sind Metalle, Ferrite aber sind Verbindungen. Sie finden wichtige Anwendung, weil sie zwar magnetisch, aber im Gegensatz zu den Metallen nicht elektrisch leitend sind. Die vollständige Untersuchung eines Kristalls wie etwa in Abbildung 30 ist ein langwieriger Pro-

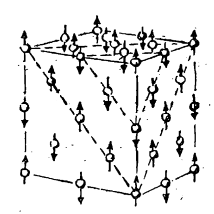


Abb. 30. Die Gitteranordnung der Elementarmagnete eines Kristalls läßt sich durch Neutronenbeugung bestimmen. Weil die verschiedenen Atome in unterschiedlicher Richtung magnetisiert sind, ist der Kristall als ganzes nur schwach magnetisch.

zeß, bei dem für jede Kristallorientierung die Richtungsverteilung der gestreuten Neutronen unter vielen Winkeln gemessen werden muß; anschließend erfolgt eine verwickelte Analyse der Resultate. Wie die Analyse der wasserstoffhaltigen Moleküle durch Neutronenbeugung noch in den Kinderschuhen steckt, so auch die Untersuchung der magnetischen Struktur. Immerhin sind schon einige Erfolge zu verzeichnen und für manche magnetische Eigenschaften Erklärungen gefunden. Die Weiterentwicklung dieser Technik wird sicher von großem theoretischen und praktischen Wert sein.

Wenn wir uns auch nur kurz damit beschäftigen konnten, haben wir jetzt doch einen gewissen Ein-

druck, wie das Kristallgitter mit vertrauten Eigenschaften der Stoffe, etwa mit Härte und magnetischen Kräften, zusammenhängt. Wir wissen jetzt auch, wie sich ein Gitter mit Hilfe von schnellen Neutronen verändern und mit Hilfe von langsamen Neutronen untersuchen läßt. Bei all diesen Betrachtungen haben wir aber nicht beachtet, daß die Atome gar nicht fest auf ihrem Gitterplatz sitzen, sondern in ständiger Bewegung sind. Wir werden jetzt diese Schwingungen der Atome genauer ansehen, denn auch hierüber haben uns die Neutronen schon interessante Aufschlüsse gegeben.

Siebentes Kapitel

KALTE NEUTRONEN UND SCHWINGENDE ATOME

Wir wissen nun, warum langsame Neutronen zur Untersuchung von Kristallgittern besonders gut geeignet sind. Nun wollen wir die Geschwindigkeit der Neutronen noch weiter herabsetzen und können jetzt mit ihrer Hilfe eine andere Eigenart der Atome feststellen – ihre Eigenbewegung. Mit einigem Aufwand ist es möglich, mit Kernreaktoren Neutronen von viel niedrigerer Energie zu erzeugen als die, die wir im vorhergehenden Kapitel betrachtet haben. Man nennt sie sinnvoller Weise »kalte Neutronen«. Für die Untersuchung der Kristallgitter sind sie vollkommen ungeeignet, denn ihre Wellenlänge ist viel zu groß, um auf Einzelheiten der Gitteranordnung anzusprechen. Statt dessen sind kalte Neutronen aber von großem Nutzen bei der Feststellung der Bewegungen oder Schwingungen, die die Atome aller Stoffe ausführen.

Alle Atome sind in ständiger, schneller Bewegung – je höher die Temperatur, desto höher die Geschwindigkeit. Indirekte Anzeichen für diese Bewegungen haben wir schon lange; jetzt aber können wir sie mit Hilfe der kalten Neutronen in allen Einzelheiten direkt feststellen. Die kalten Neutronen reagieren gerade wegen ihrer niederen Geschwindigkeit empfindlich auf Schwingungen von Atomen, die eine viel höhere Temperatur besitzen. Wenn ein Neutron von einem schwingenden Atom getroffen wird, erfährt es eine starke Geschwindigkeitsänderung, aus welcher

die Atombewegung genau zu berechnen ist. Wir wollen zunächst kurz betrachten, auf welche Weise man kalte Neutronen herstellt, und werden uns dann den Methoden zuwenden, mit deren Hilfe sie direkt über die Atombewegung in Kristallen Auskunft geben.

EIGENSCHAFTEN KALTER NEUTRONEN

Einige wenige Elemente – eines davon ist der Kohlenstoff im Graphit – zeigen praktisch keine Neigung zur Absorption von Neutronen. Im Graphit kann ein Neutron viele Male mit den einzelnen Kohlenstoffkernen zusammenstoßen, ohne eine Kernreaktion auszulösen und dabei zu verschwinden. Bei jedem Zusammenstoß prallt aber das Neutron am Kern ab, überträgt auf ihn einen Teil seiner Energie und bewegt sich daher langsamer. Wie wir später erfahren, verwendet man zu eben diesem Zweck in vielen Kernreaktoren einen Graphit-*Moderator.* Wenn schnelle Neutronen in einen Graphitblock eindringen, ist innerhalb einer tausendstel Sekunde ihre Energie auf die der Graphitatome gesunken, die natürlich in dauernder Bewegung sind. Wir können in diesem Fall also wirklich mit Recht von einer »Temperatur« der Neutronen sprechen und sagen, sie seien auf die Temperatur des Graphits »abgekühlt« worden. Diese Abkühlung oder Moderation ist nur möglich, weil Kohlenstoffkerne eine derartig geringe Neigung zur Absorption von Neutronen besitzen.

Wenn ein Stück Graphit oder irgend sonst ein Stoff eine bestimmte Temperatur hat, dann bewegen sich nicht alle Atome mit derselben Energie. Manche bewegen sich schneller, manche langsamer als der Durchschnitt. Dieselbe Geschwindigkeitsverteilung haben

aber innerhalb des Graphits auch die Neutronen; manche sind schneller, manche langsamer. Wir können sogar Neutronen finden, die sich *viel* langsamer bewegen als der Durchschnitt und daher viel »kälter« als die anderen sind. Natürlich machen diese Neutronen nur einen winzigen Bruchteil aus.

In einem Kernreaktor der üblichen Bauweise werden aber schnelle Neutronen erzeugt und mit Hilfe von Graphit verlangsamt. Die Neutronen entstehen bei der Spaltung von Urankernen, laufen mit hoher Geschwindigkeit in den Graphitmoderator, werden jedoch bald auf die Temperatur des Graphits abgekühlt. Unter diesen moderierten Neutronen ist der Prozentsatz der sehr langsamen, also kalten Neutronen, nur klein; die Gesamtzahl der Neutronen ist aber so ungeheuer groß, daß eine genügende Menge kalter Neutronen für Experimente zur Verfügung steht.

In einem aus dem Reaktor austretenden Neutronenstrahl muß man die kalten Neutronen erst von den wärmeren trennen. Man erreicht das, indem man den Strahl durch ein Material schickt, das Neutronen nur schwer absorbiert – zum Beispiel Beryllium, Graphit oder Blei. Wenn ein derartiges Material in der Form von kleinen Kristalliten vorliegt, wie es Abbildung 31 zeigt, läßt es nur sehr kalte Neutronen durch. Wie wir wissen, haben Neutronen von etwa Zimmertemperatur eine solche Wellenlänge, daß sie beim Durchlaufen eines Kristalls so gestreut werden, wie wir es bei den Versuchen über Neutronenbeugung gesehen haben. Die kalten Neutronen aber werden von den Kristalliten nicht gestreut. Ihre Wellenlänge ist größer als der Atomabstand; es kann keine Neutronenbeugung auftreten, und die Neutronenwellen

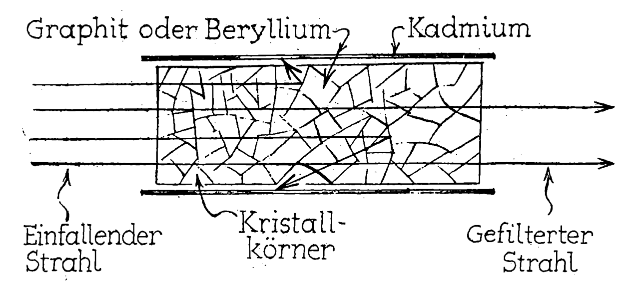


Abb. 31. »Kalte« Neutronen, also solche, die eine niedere Geschwindigkeit besitzen, kann man mit dieser Anordnung aus einem Strahl ausfiltern. Die Kristallkörner streuen die schnellen Neutronen, die dann vom Kadmium absorbiert werden. Langsame Neutronen laufen ungehindert durch.

durchlaufen die Kristallite ungehindert. Als Folge dieser selektiven Streuung wirkt der Graphitblock als *Neutronenfilter:* kalte Neutronen laufen frei durch, aber die schnelleren Neutronen werden von den Kristallkörnern gestreut und in einem um den Graphitblock liegenden Kadmiummantel – einem starken Absorber – eingefangen.

Ein Material zur Ausfilterung kalter Neutronen ist wie gesagt Graphit, ein weiteres das Metall Beryllium, das einen noch intensiveren Strahl liefert als Graphit. Wenn Neutronen ein Berylliumfilter durchlaufen haben, sind sie weit kälter als ihre Umgebung. Ihre Temperatur beträgt dann etwa 35 Grad über dem absoluten Nullpunkt, also 238 Grad unter dem Gefrierpunkt des Eises; da kann man wohl nicht mehr bezweifeln, daß Beryllium die Neutronen »kühlt«! In atomarem Maßstab bewegen sich Neutronen dieser extrem tiefen Temperatur langsam, wenn auch natürlich ihre Geschwindigkeit im Ver-

gleich zu der gewöhnlicher Objekte noch hoch ist. Durch Beryllium gefilterte Neutronen haben eine Geschwindigkeit von etwa 750 Metern pro Sekunde oder 2700 Stundenkilometern! Nach subatomaren Maßstäben gemessen, sind diese Neutronen sogar sehr langsam, denn die meisten Zerfallsprodukte einer Kernreaktion sind etwa tausendmal schneller.

Aber sogar im Vergleich zu normalen Objekten laufen kalte Neutronen nicht so sehr schnell, denn man kann ihre Geschwindigkeit mit relativ einfachen Methoden messen. In der Tat kann man die Neutronen dieser Geschwindigkeitsbereiche aus einem Strahl isolieren, wenn man in Betracht zieht, daß sie zur Zurücklegung einer gewissen Strecke eine ganz bestimmte Zeit brauchen. Man benützt dazu einen mechanischen Geschwindigkeitsselektor, wie ihn Abbildung 32 zeigt, eine Anordnung von umlaufenden Scheiben mit Schlitzen. Wie man sieht, müssen die Neutronen eine bestimmte Geschwindigkeit haben, damit sie bei beiden Scheiben gerade zum richtigen Zeitpunkt ankommen und durch die Öffnung gelangen. Auf diese Weise können Neutronen jeder gewünschten Geschwindigkeit aus dem Strahl herausgefiltert werden; alle anderen Neutronen werden von den Scheiben absorbiert. Dieser mechanische Selektor hat eine ähnliche Wirkung wie der vorhin beschriebene Filter, denn beide wählen gewisse Neutronengeschwindigkeiten aus. Im Vergleich zum Filter hat der Selektor den Vorteil, daß man die ausgewählten Geschwindigkeiten leicht variieren kann, indem man die Umlaufzeit der Scheiben ändert. Leider ist jedoch die erhaltene Neutronenzahl sehr gering, weil jede Scheibe jeweils nur ganz kurze Zeit »offen« steht.

Beide Methoden zu der Herstellung von kalten

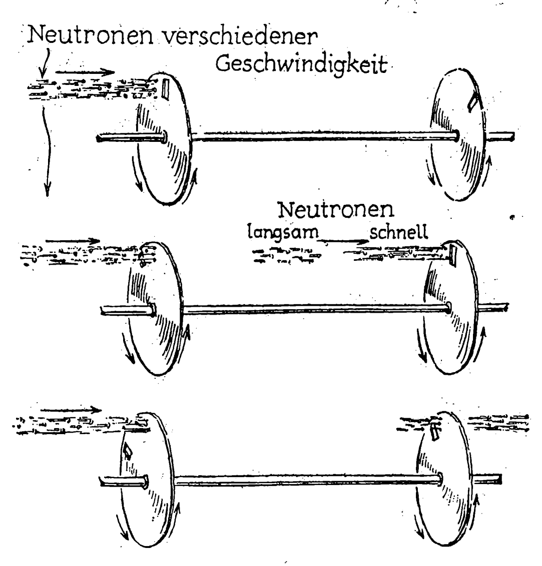


Abb. 32. Der in dieser schematischen Darstellung gezeigte »Neutronenzerhacker« ist ein mechanischer Geschwindigkeitsselektor, der nur Neutronen einer bestimmten Geschwindigkeit durch seine Schlitze läßt. Zum Regulieren dient die Umlaufgeschwindigkeit der Scheiben. In der Praxis treffen die anlaufenden Neutronen auf die gesamte Fläche der ersten Scheibe. Was austritt, ist dann nicht ein einzelnes Bündel, sondern ein schraubenförmiger Strahl Neutronen von gleicher Geschwindigkeit. Gewöhnlich hat diese Vorrichtung mehrere Scheiben, um die Präzision der Geschwindigkeitsauslese zu erhöhen.

Neutronen, der Filter und der mechanische Geschwindigkeitsselektor, sind von großem Nutzen für die Untersuchung der Atombewegung. Langsame Neutronen dringen tief in das untersuchte Objekt ein, werden dabei durch Zusammenstöße mit Atomen beeinflußt und lassen die Atombewegung klar bis in die Einzelheiten erkennen. Ehe wir uns aber diese inter-

essanten und aufschlußreichen Experimente ansehen, wollen wir einige einfache Eigenschaften bewegter Atome betrachten.

ATOMSCHWINGUNGEN SIND WÄRMEENERGIE

Es ist seit langem bekannt, daß Wärme nur eine der vielen Formen ist, in denen Energie auftritt, und wir wissen, daß die Temperatur ein Maß für die in einem Körper enthaltene Wärmemenge ist. Wenn man zum Beispiel einem Stück Eisen Wärme zuführt, steigt seine Temperatur; wenn man doppelt soviel Wärme zuführt, ist der Temperaturanstieg doppelt so groß, vorausgesetzt, daß das Eisen nicht schmilzt. Wenn wir die einzelnen Atome im Eisenstück mit einer Art von Supermikroskop betrachten könnten, stellten wir fest, daß sie in ständiger Hin- und Herbewegung sind. Wir könnten auch erkennen, daß sie sich nach Zuführung von Wärme schneller bewegen. Je höher die Temperatur, desto rascher bewegen sich die Eisenatome, wobei jedes um eine mittlere Lage im Gitter des Eisenkristalls schwingt. Die Temperatur des Eisenkörpers ist der durchschnittlichen Schwingungsenergie proportional; einzelne Atome haben mehr Energie als der Durchschnitt, andere weniger.

Betrachten wir die Atombewegung in Kristallen genauer, so erscheint sie uns nicht nur wegen ihres Zusammenhanges mit der Temperatur interessant, sondern auch wegen der Tatsachen, die sie uns darüber enthüllt, warum Atome überhaupt Kristallgitter bilden. Zwischen den Atomen existieren elektrische Kräfte, die sie bei der Bildung des Kristalls in

eine regelmäßige Anordnung zwingen. Demzufolge ist die Bewegung eines Atoms keineswegs unabhängig von derjenigen der Nachbaratome im Kristall; in der Tat geben die Einzelheiten der Bewegung direkten Aufschluß über die Kräfte zwischen den Atomen. Stört man ein Atom und setzt es in Bewegung, so bewegt sich das nächste Atom auf Grund der zwischen ihnen herrschenden Kräfte mit. Das zweite Atom beeinflußt wiederum das dritte und so weiter, so daß sich die Bewegung auf ähnliche Weise durch den Kristall fortpflanzt wie eine Welle durch Wasser. Genauer gesagt: Die Ausbreitung der Störung durch den Kristall *ist* eine Welle.

Diese Art von Welle, die sich durch den Kristall ausbreitet, nennt man »Schallwelle«, wenn auch ihre Tonhöhe viel zu groß ist, als daß man sie wirklich hören könnte. In einem Kristall gibt es Schallwellen mit ungeheuer vielen Tonhöhen oder *Frequenzen*, von den ganz niederen Frequenzen, auf die das menschliche Ohr anspricht, bis zu milliardenmal größeren. Die höchsten Frequenzen, die unser Ohr wahrzunehmen vermag, betragen wenig mehr als zehntausend Hertz (Schwingungen pro Sekunde). In Kristallen existieren aber Frequenzen bis zu 10^{13} Hz, die also etwa 10^9mal größer sind als die höchsten Frequenzen des Hörbereichs. Die physikalischen Gesetze, die ihr Verhalten regeln, sind aber trotz dieses milliardenfachen Unterschiedes in der Frequenz die gleichen.

Viele Jahrzehnte lang war es experimentell unmöglich, Einzelheiten der bei Zuführung von Wärme in Kristallen auftretenden Atombewegung zu erkennen. Weit schlimmer noch, der Zusammenhang zwischen zugeführter Wärmeenergie und beobachtetem Temperaturanstieg ließ sich überhaupt nicht durch

Annahme von Schwingungen erklären! Gerade dieses Problem gab den endgültigen Anstoß zur Entdekkung der Quantenmechanik im Jahre 1900. Bei Wärmezufuhr verhalten sich Atome nicht wie einfache mechanische Körper, die durch wohlbekannte elektrische Kräfte zusammengehalten werden und Energie in beliebigen Mengen aufnehmen können. Statt dessen wird die Energie in einer an großen Körpern bisher nicht beobachteten Weise aufgenommen, nämlich immer in ganz bestimmten Beträgen, niemals kontinuierlich. Die Absonderlichkeiten dieses Prozesses ließen den deutschen Physiker Planck erkennen, daß Energie, wie wir schon im dritten Kapitel sagten, nur in diskreten Mengen, den *Energiequanten*, existiert.

Ausgehend von der Quantenmechanik, führte man genaue theoretische Berechnungen der Atomschwingungen durch. Bis vor kurzem gab es keine direkte Methode zur Beobachtung dieser Schwingungen, um sie mit den Vorhersagen der Quantenmechanik vergleichen zu können. Natürlich läßt sich die *durchschnittliche* Schwingungsenergie leicht aus dem gemessenen Temperaturanstieg bei einer bestimmten Wärmezufuhr bestimmen, denn die Temperatur ist ein direktes Maß für die durchschnittliche Bewegungsenergie. Diese Messungen geben aber keine Auskunft über Details, wie etwa über die Häufigkeit von Schwingungen verschiedener Frequenzen. Seit aber langsame Neutronen aus Reaktoren zur Verfügung stehen, ist es möglich, die Atombewegung so direkt zu beobachten, daß wir fast im gesamten Frequenzbereich die Schwingungen beinahe »sehen« können. Diese Experimente, welche wir uns jetzt ansehen wollen, sind ein hochinteressantes Beispiel für die

Fähigkeit der Neutronen, in die Materie einzudringen und genaue Einzelheiten ihres Aufbaus und die Bewegung ihrer Atome zu enthüllen.

WIE KALTE NEUTRONEN DIE ATOMBEWEGUNG ANZEIGEN

Wie wir berichteten, sind kalte Neutronen zum Teil deshalb von so großem Wert für die Untersuchung der Atombewegung in Kristallen, weil sie feste Körper so leicht durchdringen. Noch wichtiger aber ist, daß sich bei Zusammenstößen mit bewegten Atomen die Energie der Neutronen um einen Wert ändert, der weit größer ist als ihre Ausgangsenergie. Beide Vorteile hängen zusammen; die »Kälte« der Neutronen ist es, die ihnen ihr großes Durchdringungsvermögen verleiht; die Wellenlänge ist zu groß, als daß im Kristall die übliche Neutronenbeugung auftreten könnte. Bei kalten Neutronen tritt eine ganz andere Art der Streuung auf. Das Atom trifft bei seiner Bewegung das sehr langsame Neutron und schlägt es aus dem Kristall hinaus. Obwohl äußerst selten, ist diese Streuung unter großem Energiegewinn jetzt für uns besonders interessant. Die gestreuten Neutronen verlassen den Kristall viel schneller, als sie in ihn eingelaufen sind. Messen wir die Geschwindigkeitsverteilung der auftauchenden Neutronen, so erhalten wir ein direktes Bild der im Kristall vorhandenen Energien, d.h. der Bewegungen der Atome.

In Abbildung 33 ist die Methode zur Erzeugung kalter Neutronen und ihre Verwendung bei der Bestimmung der Atombewegung kurz skizziert. Aus einem Loch in der Reaktorwand tritt ein Neutronenstrahl von etwa Zimmertemperatur, denn sein Ursprungsort ist der Graphitmoderator des Reaktors.

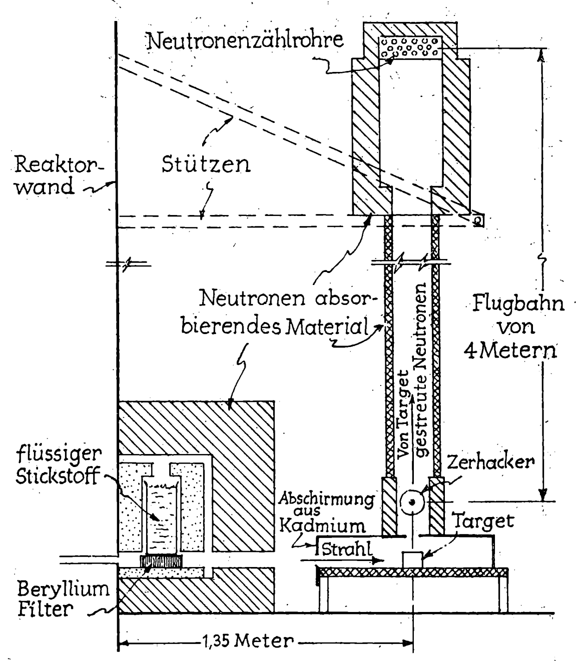


Abb. 33. Man mißt Atomschwingungen mit Hilfe von kalten Neutronen in der hier schematisch abgebildeten Apparatur. Das Filter wird mit flüssigem Stickstoff (Temperatur etwa – 200° C) gekühlt, um mehr kalte Neutronen zu erzeugen. Nach dem Streuvorgang in der zu untersuchenden Materialprobe laufen die Neutronen zur Messung ihrer Geschwindigkeit durch einen Zerhacker zu den Zählrohren.

Er läuft durch ein Filter, in diesem Fall Beryllium. von welchem wir wissen, daß es nur die ganz kalten Neutronen in Richtung auf das zu untersuchende Material (Target) durchläßt.

Durch die Atombewegung in der Materialprobe werden einige der durchlaufenden Neutronen gestreut und erhalten eine viel höhere Energie, als sie

bei ihrem Eintritt hatten. Weil der Sinn dieses Versuches darin besteht, die Energie der gestreuten Neutronen festzustellen, ist dafür gesorgt, daß man ihre Geschwindigkeit messen kann. Zu diesem Zweck setzt man in den Weg der in einer bestimmten Richtung gestreuten Neutronen (in diesem speziellen Fall der unter 90 Grad gestreuten) einen Verschluß, der jeweils nur einige Millionstel Sekunden offen ist. Durch eine elektronische Anordnung mißt man die Zeit zwischen dem Zuklappen des Verschlusses und dem Eintreffen der Neutronen im Zählrohr. Diese für das Durchlaufen der Strecke zwischen Verschluß und Zählrohr benötigte Zeit ergibt die Geschwindigkeit und damit die Energie der gestreuten Neutronen. Der »Verschluß« ist in der Praxis ein schnell umlaufender Zylinder mit Schlitzen, die bei der Umdrehung Neutronen durchlassen. Aus offensichtlichen Gründen nennt man das einen »Neutronenzerhacker«.

Es zeigt sich, daß bei den meisten Stoffen bei gewöhnlicher Temperatur die Energie der gestreuten Neutronen – das heißt ihre Temperatur – etwa der Temperatur der streuenden Probe entspricht. Somit wird der Neutronenstrahl wirklich »erwärmt«, und zwar von 238 Grad unter Null auf 20 Grad über Null, also um 258 Grad, und das durch jeweils einen einzigen Streuprozeß pro Neutron!

Obgleich die Energie der gestreuten Neutronen in direkter Beziehung zur Energie der Atomschwingungen steht, ist die Analyse der Meßergebnisse im allgemeinen recht kompliziert, und es ist schwierig, jede Einzelheit der Atombewegung aus ihnen herauszulesen. Zum Glück gibt es Kristalle, deren Analyse besonders einfach ist. Da diese Technik erst vor kurzer Zeit entwickelt wurde, hat man sie bis jetzt haupt-

sächlich auf die einfacheren Stoffe angewandt. Um die Zweckmäßigkeit der neuen Methode für die Bestimmung der Atombewegung darzulegen, wollen wir die Meßergebnisse bei zwei besonders einfachen Stoffen betrachten, nämlich bei dem Metall Vanadium und bei Zirkoniumhydrid, einem Material, das Wasserstoff enthält.

DIE VERTEILUNG DER SCHWINGUNGSFREQUENZEN

Die Bestimmung der Atomschwingungen mit Hilfe von kalten Neutronen ist bei den meisten Kristallen ziemlich kompliziert, weil Neutronen von derart niederer Energie besonders starke Welleneigenschaften zeigen. Es ist also keineswegs so, daß ein Neutron wie ein kleines Teilchen von einem einzelnen Atom getroffen wird, wie wir uns das etwa vorstellen. Derart langsame Neutronen sind in Wirklichkeit weit ausgebreitete Wellen und treten gleichzeitig mit vielen Kernen des Kristalles in Wechselwirkung. All diese Effekte addieren sich. Die einzelnen Wellen interferieren miteinander, genau wie das Wellengekräusel auf der Oberfläche eines Teiches. Dadurch wird das Ergebnis der Streumessungen recht kompliziert. Das gilt bei den meisten Kristallen, und nur bei ganz wenigen, besonders bei Vanadium und Wasserstoff, ist der Vorgang viel einfacher.

Diese Einfachheit der Neutronenstreuung an Vanadium und Wasserstoff rührt von der ungewöhnlichen Tatsache her, daß die von jedem Atom dieser beiden Elemente gestreuten Neutronenwellen vollkommen unabhängig von allen anderen Streuprozessen sind. Die Unabhängigkeit der Streuung hängt mit Beson-

derheiten im Aufbau der Vanadium- und Wasserstoffkerne zusammen, und wenn wir hier auch nicht auf Einzelheiten eingehen können, so ist doch das Ergebnis leicht zu formulieren: Wenn ein Neutron an einem Vanadiumkern gestreut wird, tritt es ohne jede Rücksicht auf Nachbaratome *nur* mit diesem Kern in Wechselwirkung. Daher sind die Streuergebnisse einfach und geben uns direkt die Energie der im Kristall schwingenden Vanadiumatome an.

Weil das Vanadium kalte Neutronen in so einfacher Weise streut, eignet es sich hervorragend dazu, die theoretisch vorhergesagten verschiedenartigen Schwingungen im Kristall nachzuprüfen. Seit vielen Jahren glaubte man, daß die Verteilung der Schwingungsenergien oder -frequenzen ganz einfach ist, konnte aber nie direkte Messungen anstellen. Die Theorie nahm an, daß mit steigender Frequenz, also mit steigender Energie, die Schwingungen immer häufiger werden und dann bei einer bestimmten Grenzfrequenz abrupt auf Null absinken. Jetzt ist es möglich, die Theorie direkt zu kontrollieren, und aus den Neutronenmessungen an Vanadium weiß man heute, wie die Energie auf die verschiedenen Frequenzen im Kristall verteilt ist.

Die Meßergebnisse über die Frequenzverteilung – bis zu den höchsten festgestellten Frequenzen von etwa 10^{13} Hz – sind in Abbildung 35 zu sehen. Es zeigt sich, daß bei niederen Frequenzen – das heißt, Frequenzen im Hörbereich – die Frequenzverteilung einfach der theoretischen Kurve folgt. Bemerkenswerter aber sind die Resultate bei den sehr hohen Frequenzen von einigen Billionen Hz, wo sich statt der von der Theorie vorhergesagten glatten Kurve in Wirklichkeit Maxima und Minima ergeben.

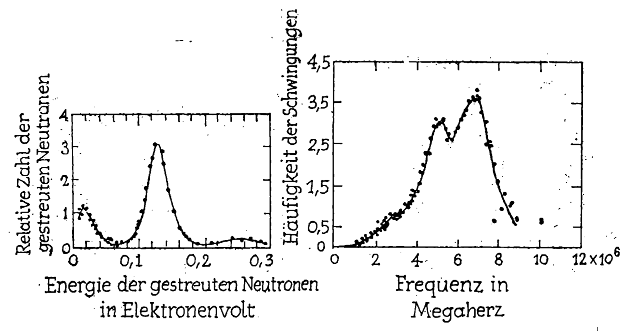


Abb. 34–35. Die experimentellen Ergebnisse der in Abbildung 33 skizzierten Apparatur sind ein Beispiel dafür, wie weit die Wissenschaft die Atombewegung doch schon aufklären konnte. Abbildung 34 (links) zeigt die Energie der von Zirkoniumhydrid gestreuten Neutronen. (Das scharfe Maximum bei etwa 0,12 eV rührt von einer starken optischen Schwingung her; die Atome schwingen hier mit der Frequenz von infrarotem Licht.) Abbildung 35 zeigt die Verteilung der atomaren Schwingungsfrequenzen von Vanadium.

Die Ursache für das Versagen der Theorie bei hohen Frequenzen ist darin zu suchen, daß sie auf einem viel zu einfachen Bild oder Modell des Kristalls beruht. In diesem Modell sind die Unterschiede von Atom zu Atom nicht berücksichtigt, Unterschiede, die nur für kurze Wellenlängen, das heißt hohe Schwingungsfrequenzen von Einfluß sind. Die Meßergebnisse besagen, daß im Kristall die Verhältnisse viel komplizierter sind, als die einfache Theorie annimmt. Wir können aus ihnen entnehmen, in welcher Weise der wirkliche Kristall vom theoretischen Modell abweicht. Theoretische Berechnungen jüngsten Datums, die die Feinstruktur der Kristallgitter und die unterschiedlichen Kräfte zwischen verschiedenen Atomen berücksichtigen, haben gezeigt, daß Maxima, von der

Art des in der Abbildung gezeigten, tatsächlich auftreten müssen. Die theoretische Berechnung ist aber mühsam und langwierig, und für Vanadium ist noch kein genaues Ergebnis möglich. Hier erhält man leichter die exakten Meßwerte als die berechneten theoretischen Ergebnisse. Für das volle Verständnis der Kräfte zwischen den Atomen im Kristall sind aber die einen so notwendig wie die andern.

OPTISCHE SCHWINGUNGEN VON WASSERSTOFF

Weil viele wichtige Materialien Wasserstoff enthalten, ist es ein glücklicher Umstand, daß die Streuung kalter Neutronen an Wasserstoff ein ebenso einfacher Vorgang ist wie die an Vanadium und daß sich demnach die Meßergebnisse leicht auswerten lassen – soweit man dabei überhaupt von »leicht« sprechen kann. Wenn wir also die Streuung von kalten Neutronen an wasserstoffhaltigen Materialien betrachten, brauchen wir nicht die komplizierte Interferenz von Wellen zu berücksichtigen. Die Energie der gestreuten Neutronen ist – genau wie bei Vanadium – ein direktes Abbild der Atombewegung.

Natürlich besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen wasserstoffhaltigen Kristallen und dem Element Vanadium, denn in den ersteren ist ja der Kristall aus verschiedenartigen Atomen aufgebaut. Demzufolge wird eine Bewegung möglich, wie sie in einem einfachen Kristall, etwa in Vanadium, in dem nur eine Sorte von Atomen vorkommt, nicht auftreten kann. Bei dieser Bewegungsform schwingen zwei verschiedene Arten von Atomen ständig gegeneinander. Diese Schwingungen sind keine Schallwellen,

sondern ähneln der Bewegungsform, die in einem Kristall auftritt, wenn er Licht absorbiert. Die Frequenz ist extrem hoch: 10^{13} Schwingungen pro Sekunde oder zehn Terahertz, also die Frequenz von infrarotem Licht, nicht die von Schall. Man spricht hier von *optischen Schwingungen* im Gegensatz zu den schon betrachteten *akustischen Schwingungen.* Akustische Schwingungen haben eine niedrigere Frequenz, und sind bei sehr niederen Frequenzen – unter 10^{-4} Hz – mit den gewöhnlichen Schallwellen identisch.

Die optischen Frequenzen lassen sich mit kalten Neutronen auf genau die gleiche Weise studieren, wie wir das im vorigen Abschnitt bei den akustischen Schwingungen kennengelernt haben. An einem bestimmten wasserstoffhaltigen Kristall, Zirkoniumhydrid, hat man die optischen Schwingungen zum erstenmal mit Hilfe kalter Neutronen untersucht. Man verwendet dieses Material in einem bestimmten Reaktortyp zur Verlangsamung von schnellen Neutronen, also als »Moderator«. Für die Betriebssicherheit des Kernreaktors ist es dabei sehr wichtig, auf welche Weise die Energie *von* den Neutronen *auf* die Zirkonium- und Wasserstoffatome übertragen wird. Wenn die Streuung die Neutronen fast auf die Temperatur des Moderators verlangsamt hat, erlangen die Details der Gitterschwingungen, speziell der hochfrequenten optischen, größte Bedeutung.

Streuversuche von kalten Neutronen an Zirkoniumhydrid lassen uns erkennen, welche Energien die Neutronen aus den Gitterschwingungen *aufnehmen,* während im Reaktor der umgekehrte Vorgang auftritt: Im Reaktor geben die Neutronen Energie an das Gitter ab. Dennoch erhalten wir aus den

Versuchen mit kalten Neutronen die gewünschte Information, denn das Gitter gibt an die kalten Neutronen genau die gleichen Energiebeträge ab, die es im Kernreaktor von schnellen Neutronen aufnehmen würde. Bei den Energiemessungen an Zirkoniumhydrid durch Streuung von kalten Neutronen fällt, wie wir in Abbildung 34 sehen, ein hohes Maximum auf. Die Schwingung, die dieses Maximum verursacht, ist von hoher Freqenz, liegt also bestimmt im Bereich der optischen Wellen. Die Energie der Neutronen dieses Maximums entspricht mit 1300 Grad Celsius einer Temperatur, die weit über der eines Moderators im Reaktor liegt. Bei einem Moderator aus Zirkoniumhydrid ist es also außerordentlich wahrscheinlich, daß Neutronen, wenn sie durch Zusammenstöße langsamer geworden sind, plötzlich Energie an die Atome abgeben und diese mit der optischen Schwingung erregen, sobald sie deren Temperatur erreicht haben. Offensichtlich muß diese Energieabsorption starken Einfluß auf die Wirkungsweise des Reaktors haben – in diesem Falle macht sie ihn stabiler.

Die eben betrachteten Experimente mit kalten Neutronen zeigten uns wieder, wie außerordentlich wirksam Neutronen schwierige, bisher nicht lösbare Probleme aufklären. Wenn wir auch nur zwei Beispiele betrachten konnten, haben wir jetzt doch einen gewissen Eindruck, auf welche Weise wir unseren Versuchsergebnissen grundlegende Erkenntnisse über die Kräfte zwischen den Kristallatomen entnehmen und wichtige praktische Ergebnisse erzielen können. Jetzt aber müssen wir unseren kurzen Ausflug in das Gebiet der Kristallgitter und der Atombewegungen abschließen und uns dem größten Erfolg des Neutrons zuwenden: der Kettenreaktion.

Achtes Kapitel

DIE KETTENREAKTION

Schon zu Beginn unseres Berichts haben wir gesehen, wie das Neutron in kurzer Zeit Weltbedeutung gewonnen hat. Nur dreizehn Jahre war es alt, als die Atombombe alle Welt auf seine Macht aufmerksam machte. Gewaltige Mengen von Kernenergie wurden freigemacht, elektrische Energie wurde erzeugt, in großem Umfang entstanden Radioisotope, Schiffe fahren mit Atomantrieb – alles praktische Anwendungen der Kettenreaktion, die durch das Neutron möglich wurden.

Bei der Kettenreaktion wird Kernenergie frei; hat sie einmal eingesetzt, so kann sie gewaltige Ausmaße erreichen. Sie beruht auf einer speziellen Form der Kernumwandlung, der Kernspaltung, die nur bei den schwersten Kernen auftritt. Nur weil Neutronen schwere Kerne zu spalten vermögen, ist die Kettenreaktion mit ihren vielen Anwendungsgebieten – Elektrizitätswerken, Schiffsmotoren und Bomben – möglich. Seit kurzem beschäftigt man sich in steigendem Maße mit einer anderen Art der Kettenreaktion, die auf der *Fusion*, der Verschmelzung leichter Kerne beruht, aber fast die gesamten bisherigen Erfolge der Atomenergie beruhen nur auf der Kernspaltung. Wir wollen uns zunächst kurz mit dieser ungewöhnlichen Art von Kernreaktion befassen, wollen dann sehen, wie die Atombomben und Kernreaktoren funktionieren, und werfen zum Schluß einen kurzen Blick auf die Kernfusion. Zwar haben wir hier nur wenig Raum, um auf technische Details einzugehen, aber

unser Bericht vom Neutron wäre unvollständig, wollten wir nicht wenigstens kurz aufzeigen, auf welche Weise dieses kleine Teilchen unser aller Leben in weitestem Ausmaß zu verändern bestimmt ist.

GRUNDLAGEN DER KERNSPALTUNG

Seit Einstein die Äquivalenz von Masse und Energie bewies, sind sich die Wissenschaftler der Möglichkeit bewußt, die Materie selbst als Energiequelle zu verwenden. Die einzigen für diese Umwandlung bekannten Beispiele waren aber vor der Entdeckung der Spaltung Kernreaktionen, bei denen nur eine ganz kleine Anzahl von Kernen in andere umgewandelt wurde, also wenig Masse als Energie in Erscheinung trat. Wie wir wissen, wurden Kernreaktionen leichter möglich, sobald langsame Neutronen zur Verfügung standen. Aber auch da war die Zahl der bei Neutronenbeschuß umgewandelten Kerne viel zu klein, um praktisch verwertbare Mengen von Energie zu erzeugen. Einige Jahre nach der Entdekkung des Neutrons gab es viele Forscher, die sich mit den vom Neutron hervorgerufenen Kernumwandlungen befaßten, hauptsächlich um die Struktur des Kerns kennenzulernen. Niemand glaubte ernstlich an die Möglichkeit, daß einmal größere Mengen Materie zum Verschwinden gebracht und dadurch beträchtliche Energiebeträge gewonnen werden könnten. Dieser Pessimismus war darin begründet, daß man keinen Prozeß kannte, durch den sich eine Kernumwandlung von selbst durch einen Stoff ausbreitet. Man wußte nicht, wie die Umwandlung eines Kerns einen anderen Kern auch zur Umwandlung bringen sollte.

In der Tat kam die Entdeckung des Prozesses, der schließlich die Ausbreitung von Kernreaktionen möglich machte – die Spaltung –, völlig unerwartet. Im Jahre 1938 beschossen zwei deutsche Forscher, Otto Hahn und F. Straßmann, eine Anzahl von Elementen mit Neutronen, wie das auch viele andere Wissenschaftler auf der ganzen Welt taten. Sie entdeckten, daß sich im Gegensatz zu den meisten anderen Kernen, die sich bei Neutronenabsorption nur geringfügig wandeln, der Urankern stark verändert. Wie in Abbildung 36 dargestellt ist, bricht er sogar entzwei. Außerdem war das Gesamtgewicht aller Spaltprodukte des Urans geringer als das ursprüngliche Gewicht des Urankerns. Und wie aus Einsteins Formel folgt, erscheint die Massendifferenz als Energie – besser gesagt, dieser Teil der Masse wird in Energie umgesetzt. Die Energie tritt in Form von *kinetischer Energie* als Bewegung der Bruchstücke des Urankerns auf, die mit riesiger Geschwindigkeit auseinanderfliegen.

Soweit wir ihn bis jetzt betrachten konnten, unterscheidet sich der Prozeß der Kernspaltung, so erstaunlich er ist, nur dadurch von einer gewöhnlichen Kernreaktion, daß viel mehr Energie frei wird, nämlich etwa hundertmal soviel. Bald nach der Entdeckung der Spaltung stellte man etwas Bemerkenswertes an ihr fest, was sie zu einem einzigartigen Prozeß unter allen Kernreaktionen machte: Wenn sich nämlich der Urankern teilt, entsteht nicht nur Energie, sondern es werden zusätzlich noch einige Neutronen (Abbildung 36) emittiert. Wenn wir uns den Aufbau des Kerns ansehen, ist die Emission von Neutronen eigentlich nicht verwunderlich. Der Urankern enthält sehr viele Neutronen, und die bei der Spaltung

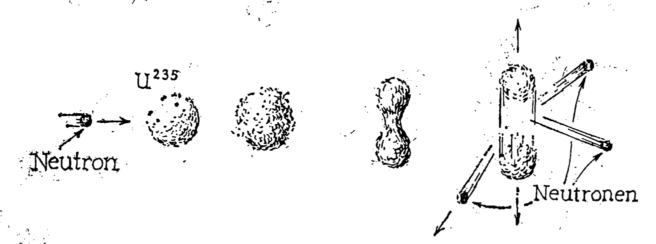


Abb. 36. Die Spaltung von U^{235} kann man sich in einzelne Stufen aufgelöst denken: Zuerst wird ein Neutron im Kern absorbiert; als zweites hat man einen angeregten Kern; dann beginnt die Spaltung; zum Schluß ist die Spaltung vollkommen, wobei zwei oder drei Neutronen emittiert werden.

auftretende Energie läßt einige Neutronen aus den wegfliegenden Bruchstücken »verdampfen«.

Die beim Spaltungsvorgang neben der Energie emittierten Neutronen rückten auf einmal die Gewinnung praktisch verwertbarer Mengen von Kernenergie in den Bereich des Möglichen. Denn bei der Kernspaltung fangen wir mit einem Neutron an und erhalten zusätzlich zu einem großen Energiebetrag noch einige Neutronen, gewöhnlich zwei oder drei an Stelle des einen, ursprünglichen Neutrons. Wenn es auch im ersten Augenblick so scheinen mag, erhalten wir doch all das keineswegs aus dem Nichts, denn schließlich ist der Urankern ja zerfallen!

Diese Entdeckung im Anfang des Jahres 1939 drängte vielen Forschern den Gedanken auf, aus ihr eine Spaltungsreaktion zu entwickeln, die sich von selbst ausbreiten und dabei immer mehr Energie freisetzen würde. Auf die Frage, wie man denn die enormen, in den Atomkernen schlummernden Energievorräte freisetzen könne, schien die perfekte Antwort gefunden.

DIE KETTENREAKTION

Es sollte uns jetzt ebenso klar sein wie den Kernphysikern im Jahre 1939, warum die Kernspaltung eine Reaktion hervorrufen kann, die sich von selbst ausbreitet – also eine Kettenreaktion. Wenn man es fertigbringt, daß die bei der Spaltung eines Uranatomes emittierten Neutronen andere Urankerne spalten, dann entstehen weitere Neutronen, die aus noch mehr Kernen Energie freimachen können. Angenommen, ein platzender Urankern emittiert drei Neutronen, und jedes dieser Neutronen dringt wieder in einen Urankern ein, dann haben wir nach der Spaltung dieser Kerne neun Neutronen. Wiederholen wir den Vorgang noch einmal, dann haben wir 3×3×3 oder 27 Neutronen, dann 81, dann 243, 729 und so weiter.

Bei diesem ständigen Multiplizieren mit drei kommen wir sehr schnell zu enormen Zahlen; beim dreizehnten Schritt erzeugen wir bereits mehr als eine Million Neutronen! Noch dazu braucht der Vorgang eine ganz unglaublich kurze Zeit, denn die bei der Spaltung erzeugten Neutronen besitzen die hohe Geschwindigkeit von etwa dreizehntausend Kilometern pro Sekunde, und die Kerne liegen nahe beisammen. So vergeht zwischen dem Auftreten eines Neutrons bei der Spaltung des ersten Kerns und seinem Eindringen in den nächsten nur die Zeit von ein milliardestel Sekunde. Wenn also der Prozeß wie eben beschrieben abläuft, müßten sich die Neutronen alle milliardestel Sekunden verdreifachen. Dieses Wörtchen »wenn« ist aber außerordentlich wichtig. Es ist nämlich keineswegs sicher, daß die bei einer Uranspaltung entstehenden drei Neutronen wirklich drei

weitere Urankerne zur Spaltung bringen. Da macht eine Erscheinung Schwierigkeiten, mit der wir schon vertraut sind: Neutronen durchdringen Materie außerordentlich leicht und haben nur eine ganz geringe Chance, direkt auf einen Kern zu treffen. Und nur wenn ein Neutron direkt mit dem Kern eines Uranatoms zusammenstößt, kann es ihn spalten und weitere Neutronen erzeugen.

Um uns das Problem genauer zu verdeutlichen, wollen wir ein Gedankenexperiment durchführen: Stellen wir uns vor, wir schießen in ein kleines Stück Uran, etwa von der Größe einer Murmel, Neutronen ein. Ab und zu wird ein Neutron einen Urankern spalten, aber die dabei entstehenden Neutronen laufen fast mit Sicherheit aus dem kleinen Uranstück heraus, und es geschieht nichts weiter. Mit anderen Worten, unsere fortlaufende Multiplikation $3 \times 3 \times 3$ ...... tritt gar nicht ein, und wir bekommen keine Kettenreaktion. Wir können uns leicht vorstellen, was wir *im Prinzip* tun müssen, um zum Erfolg zu kommen – wir müssen das Stück Uran größer machen! Ohne genauere zusätzliche Kenntnisse ist es aber unmöglich zu sagen, wie groß das Uranstück sein muß, damit die Neutronen nicht aus ihm entweichen, sondern eine Kettenreaktion einleiten. Es wäre ja sogar möglich, daß bei noch so starker Vergrößerung des Uranstücks keine Kettenreaktion einträte. Bald nach der Entdeckung der Spaltung zeigten Experimente, daß sich nur das Isotop U^{235} spaltet, nicht aber das viel reichlicher vorkommende U^{238}. Demzufolge kann, wie man bald feststellte, kein noch so großer Klumpen natürliches Uran zur Kettenreaktion kommen. Für das reine Isotop U^{235}, das zeigten Messungen, muß aber die Kettenreaktion eintreten, sobald

man eine gewisse »*kritische Masse*« mit einem Durchmesser von mehreren Zentimetern überschreitet. Eine geringere Menge U^{235} kommt nicht zur Kettenreaktion (siehe Abbildung 37) und ist ein harmloses,

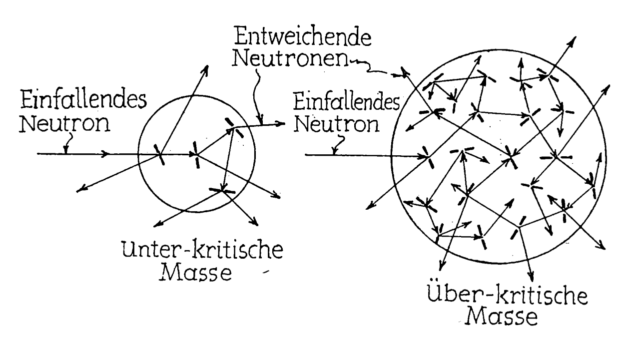


Abb. 37. Unter- und überkritische Massen von Uran verhalten sich nach der Absorption eines Neutrons verschieden. Die Abbildung zeigt das Schema des Vorgangs. Im überkritischen Stück kommt es zu viel zahlreicheren Zusammenstößen.

nichtexplosives Stück Metall. Sobald aber die kritische Masse weit genug überschritten wird, ändern sich die Verhältnisse grundlegend. Wenn in diesem Fall die Spaltung erst einmal eingesetzt hat, können die entstehenden Neutronen nicht mehr entkommen, und sowohl ihre Anzahl als auch die freiwerdende Energie wachsen rasch. Wenn die Menge von U^{235} genügend weit über der kritischen Masse liegt, entsteht eine Explosion von gewaltiger Vernichtungskraft.

Jetzt sind wir in der Lage, uns kurz anzusehen, wie die Kettenreaktion in der Atombombe und, unter ständiger Kontrolle, im Kernreaktor angewandt wird. Die äußeren Ergebnisse sind bei diesen beiden

Methoden zur Erzeugung von Kernenergie vollkommen verschieden, und doch treten in beiden dieselben Produkte der Kettenreaktion auf und zwar: (1) Energie, die aus der verschwindenden Masse entsteht und als Bewegungsenergie der Kernbruchstücke in Erscheinung tritt; (2) die Kernbruchstücke, die sehr instabil und daher außerordentlich radioaktiv sind, und (3) Neutronen, die bei jeder Kettenreaktion in großen Mengen auftreten.

DIE ATOMBOMBE

Die Kettenreaktion muß unter den idealen Bedingungen, wie wir sie aufgestellt haben, mit außerordentlicher Schnelligkeit voranschreiten und der Prozeß der Multiplikation mit drei innerhalb einer millionstel Sekunde tausende von Malen ablaufen. Fast augenblicklich muß aus der verschwindenden Masse von ungeheuer vielen zerplatzenden Kernen Energie in Form einer riesigen Wärmemenge entstehen. Wenn derartige Energiebeträge auf beschränktem Raum und in kurzer Zeit entstehen, haben wir natürlich eine Explosion von kolossalem Ausmaß. Die beschriebene Kettenreaktion von reinem U^{235} ist eine wirklich gigantische Explosion, die der vieler tausend Tonnen hochbrisanter Sprengstoffe entspricht. Eine solche Kettenreaktion spielt sich bei der Atombombe ab, wie sie 1945 zum erstenmal detonierte und inzwischen bei vielen Testexplosionen ausprobiert wurde.

Eine Menge von U^{235}, die die kritische Masse merklich überschreitet, explodiert unaufhaltsam und sofort, sobald man sie schnell in einen kompakten Klumpen zusammenballt. Es ist nicht nötig, die Ket-

tenreaktion dadurch einzuleiten, daß man diese überkritische Massenzusammenballung eigens mit Neutronen beschießt. Neutronen sind nämlich in der Erdatmosphäre ständig vorhanden. Sie entstehen durch die *kosmische Strahlung;* das sind energiereiche Protonen, die aus dem Weltraum in die Atmosphäre eindringen. Zusätzlich tritt bei einzelnen Urankernen eine *spontane Kernspaltung* ohne die Mitwirkung auftreffender Neutronen ein, wobei natürlich auch Neutronen entstehen. Demzufolge sind in Uran ständig einige Neutronen vorhanden, so daß die Kettenreaktion sofort einsetzt, wenn man nur eine überkritische Masse zusammengebracht hat.

Wenn wir uns nun überlegen, auf welche Weise wir eine überkritische Masse U^{235} praktisch zusammensetzen wollen, dann erkennen wir sofort, welch große Schwierigkeiten zu überwinden sind. Sobald die Menge den kritischen Wert auch nur um ein winziges Bißchen überschreitet, beginnt die Kettenreaktion. Da aber immer noch viele Neutronen entweichen, wächst die Intensität viel langsamer, als wir vorhin ausgerechnet haben. Schließlich würde so viel Wärme entwickelt, daß das Uran schmilzt und zerfließt; die Reaktion würde auf diese Weise abgebrochen, bevor es zu einer Explosion kommen kann. Wir sehen also, daß das Problem, eine Atombombe zu zünden – das heißt, eine Explosion von gigantischer Wirkung einzuleiten –, darin besteht, daß man eine überkritische Menge spaltbaren Materials zu einer kompakten Masse zusammengefügt haben muß, ehe eine Kettenreaktion niederer Intensität die Hauptmenge des Materials auseinandertreiben kann.

Das Bombenmaterial schnell genug zu einem Klumpen zusammenzuballen, ist keineswegs einfach. Um

eine Atombombenexplosion von gewünschter Wirksamkeit zu erreichen, das heißt eine Explosion, bei der der größte Teil des Urans gespalten wird, muß man die einzelnen unterkritischen Teile mit fast unglaublicher Geschwindigkeit zur überkritischen Masse zusammenfügen. Das ist kein eigentlich kernphysikalisches, sondern ein technisches Problem, das nur erstklassige Techniker lösen konnten, und zwar unter Verwendung starker Sprengstoffe. Mit diesen schießt man einzelne kleine und damit unterkritische Stücke Uran plötzlich so zusammen, daß eine überkritische Masse entsteht. Noch wirkungsvoller wird die Explosion, wenn man die ganze Anordnung mit einem dicken Metallmantel umgibt, der das U^{235} so lange zusammenhält, bis möglichst viele Urankerne ihre Spaltungsenergie abgegeben haben.

Bisher fanden Atombomben nur militärische Anwendung, und vielerorts hört man die Meinung, dieser doch sehr beschränkte Wirkungskreis sei der für Atombomben einzig mögliche. Seit kurzem erwägt man aber auch friedliche Verwendungsmöglichkeiten. Natürlich muß man ihre Anwendung auf die besonderen Fälle beschränken, in denen das explosive Freiwerden von Energie von großem Nutzen ist und bei denen die auftretende Radioaktivität nicht schadet. Möglicherweise lassen sich Atombomben bauen – vor allem auf der nachher zu beschreibenden Kernfusion beruhende –, bei denen die Radioaktivität keine Gefahr hervorruft. Man könnte diese Explosionen bei Bauvorhaben anwenden, bei denen große Erdmassen zu bewegen sind; ich denke da nur an den Bau von Häfen und Kanälen. Möglicherweise lassen sich versiegte Ölquellen mit Atombomben reaktivieren, indem man die sie umgebende Fels-

struktur gewaltsam verändert. Heute ist leider noch nicht genau bekannt, ob sich Atombomben wirklich in dieser segensvollen Weise und vollkommen sicher einsetzen lassen; viele Wissenschaftler beschäftigen sich aber ernsthaft mit dieser Frage. Einige Atombombenversuche haben bereits unterirdisch stattgefunden, die stärkste davon mit einem Sprengwert von zwanzigtausend Tonnen TNT, und es ist dabei gelungen, die Radioaktivität an der Ausbreitung zu hindern.

DER KERNREAKTOR

Wir wollen uns jetzt dem wichtigsten friedlichen Anwendungsgebiet zuwenden, auf dem das Neutron zu internationaler Bedeutung gelangt ist. Es handelt sich dabei um die Erzeugung von Atomenergie mit ihren vielen Anwendungsformen durch die kontrollierte Kettenreaktion. Die bisher betrachtete Kettenreaktion ist ein explosiver Vorgang, den man kaum als »kontrolliert« bezeichnen kann. Es mag vielleicht überraschen, daß es leichter ist, Atomenergie in einem langsamen, kontrollierten Prozeß zu erzeugen, als eine Atombombe zu bauen. In der Tat lief die erste Kettenreaktion nicht in der Atombombe ab, sondern schon 1942 – drei Jahre vor der ersten Atomexplosion – in einem Reaktor ganz geringer Leistung. Der Hauptgrund, warum sich die kontrollierte Kettenreaktion leichter durchführen läßt, besteht darin, daß man dazu nicht wie bei der Bombe das reine Isotop U^{235} verwenden muß, sondern daß man das Element so gebrauchen kann, wie es in der Natur vorkommt – mit etwa 99 % U^{238} und 1 % U^{235}.

Die Arbeiten, die im Jahre 1942 zur ersten Ketten-

reaktion führten, wurden an der Universität Chicago unter der Leitung von Enrico Fermi durchgeführt, dem bedeutenden Physiker, über dessen grundlegende Arbeiten zur Neutronenphysik wir bereits sprachen. Diese Kettenreaktion fand in einem Kernreaktor oder »Uranmeiler« statt, der nur aus einem großen Haufen Graphitblöcke bestand, zwischen denen Uranbrocken verteilt waren. Graphit wurde deshalb als Reaktormaterial verwendet, weil die Kohlenstoffatome, aus denen er besteht, Neutronen besonders stark verlangsamen, aber fast keine Tendenz besitzen, sie zu absorbieren. Auf diese Weise trägt die Anwesenheit des Graphits dazu bei, daß ein großer Prozentsatz der bei der Spaltung des Urans entstehenden Neutronen selbst wieder weitere Spaltungen hervorufen. Auch der Reaktor hatte, genau wie die Bestandteile einer Atombombe, eine kritische Größe, nur betrug der kritische Durchmesser nicht nur einige Zentimeter, sondern viereinhalb Meter.

Sobald man den Reaktor größer machte, als dem kritischen Wert entsprach, begann in ihm die Kettenreaktion, ohne daß er aber explodierte. Der Grund hierfür ist, daß genau wie bei reinem U^{235} die Kettenreaktion nur ganz langsam an Intensität zunimmt, falls die Uranmenge lediglich ein wenig über dem kritischen Wert liegt. Die Bauweise war genau überlegt, um einen derartigen langsamen Anstieg der Reaktorleistung sicherzustellen. Es erwies sich als ganz einfach, das Ausmaß der Kettenreaktion oder die Reaktorleistung zu regulieren. Man mußte dazu nur einen Kadmiumstab in den Reaktor stecken. Kadmium ist ein derart starker Neutronenabsorber, daß beim Einstecken die Kettenreaktion sofort aufhört. Die Reaktorleistung läßt sich durch einfache

Bewegung des Kadmium-»Kontrollstabes« auf jeder gewünschten Stärke halten.

Obgleich die Kettenreaktion niedriger Leistung leicht in Gang zu setzen war, sobald man wirklich reines Uran und wirklich reinen Graphit zur Verfügung hatte, war der Weg bis zur praktischen Gewinnung elektrischer Energie aus Kernreaktoren noch weit.

Die im ersten Atommeiler erzeugte Energie trat in Form von Wärme auf; bei längerem Ablauf der Kettenreaktion wurden Uran und Graphitstäbe heiß. Um aber Nutzleistung, etwa in Form von Elektrizität, aus der Kettenreaktion zu gewinnen, muß die Wärmeenergie abgeführt und in elektrische Energie umgewandelt werden. Die heutigen Reaktoren sehen ganz anders aus als Fermis einfacher Uranmeiler.

Die Methode der Umwandlung von Wärmeenergie in Dampf und dann mit einer Turbine in elektrische Energie ist sehr weit entwickelt, da man sie seit vielen Jahren kennt und schon lange verwendet. Wenn aber die Wärmeenergie aus der Kernspaltung stammt, treten gegenüber der Erzeugung von Elektrizität durch Verbrennung von Kohle noch manche zusätzlichen Probleme auf.

Bei jeder Kettenreaktion treten, wie wir gesehen haben, radioaktive Spaltprodukte auf. Somit fallen in jedem Atomkraftwerk große Mengen von Radioisotopen mit enormer Strahlungsintensität an. Der Umgang mit dieser Radioaktivität ist ein neuartiges, schwieriges Problem, wenn man eine Erzeugung von Elektrizität auf breiter Ebene anstrebt. Bei Erzeugung von Wärme im Kernreaktor entsteht eine derartig starke Radioaktivität, daß es unmöglich ist, Geräteteile zu reparieren. Wegen der großen Gefähr-

lichkeit der Radioaktivität ist es trotz aller Schwierigkeiten und großen Kosten notwendig, Kraftwerke zu bauen, die über Jahre hinaus keine Reparaturen nötig haben.

Gegenwärtig wird bereits in einigen Kraftwerken Elektrizität aus Kernenergie gewonnen, und auf der ganzen Welt werden ständig neue Atomkraftwerke gebaut. Wegen der aus der Gefährlichkeit der Radioaktivität entstehenden Probleme aber ist die Atomenergie leider immer noch teurer als Kohle- oder Wasserkraft. Im Laufe der Zeit wird jedoch die Kohle im Preis steigen, weil sich die Vorräte erschöpfen, die Atomwärme aber wird, je mehr Erfahrung wir damit haben, billiger werden. Somit scheint es unvermeidlich, daß eines Tages die Atomenergie der Kohle- und Wasserkraft wirklich Konkurrenz machen wird. Der genaue Zeitpunkt – Schätzungen sprechen von drei bis zehn Jahren – hängt von einer Vielzahl lokaler Bedingungen ab, aber der endgültige Ausgang scheint sicher.

Die Kernenergie ist dazu bestimmt, für die Energieversorgung der Welt der Hauptlieferant zu werden.

KERNFUSION – ENERGIEQUELLE DER ZUKUNFT?

Wir kommen jetzt zum Ende unserer Geschichte vom Neutron und befassen uns zum Abschluß mit einem Thema, das in die Zukunft weist – mit einer neuen Art von Kettenreaktion, die große Möglichkeiten verspricht, uns aber heute noch größere Schwierigkeiten macht, als die Kernspaltung. Es ist dies eine Kettenreaktion, die auf dem Prozeß der *Kernfusion*

beruht, dem der Spaltung entgegengesetzten Prozeß. Zwar wird auch hier wie bei der Kernspaltung Kernenergie in großen Mengen frei, der Vorgang beruht aber nicht auf dem Zerfall schwerer, sondern auf dem Zusammenfügen leichter Kerne. Wohl spielt das Neutron eine wichtige Rolle, ist aber im Gegensatz zur Spaltung bei der Fusion nicht der bedeutendste Faktor. Gerade dieser Umstand ist es eigentlich, der die Entwicklung einer praktisch anwendbaren Fusionsmethode so schwierig macht.

Die Spaltreaktion läuft deshalb so bereitwillig ab, weil die ungeladenen Neutronen ungehindert zu den Kernen der Uranatome gelangen können. Im Gegensatz dazu müssen sich bei der Fusion positiv geladene *Kerne*, etwa Wasserstoff und Lithium, miteinander vereinigen, damit dabei Energie frei wird – ein weitaus schwierigerer Vorgang. Die elementaren Tatsachen der beiden Prozesse sind in Abbildung 38 miteinander verglichen. Das große Hindernis auf dem Weg zur Kernfusion liegt darin, daß die leichten

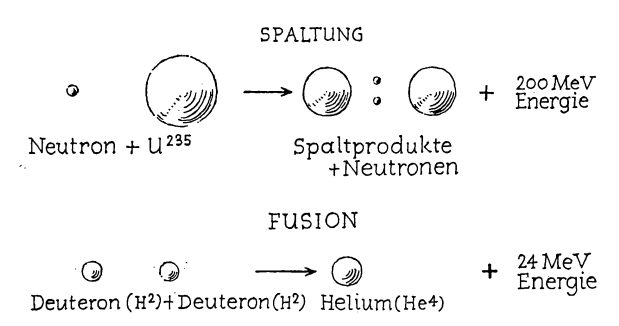


Abb. 38. Sowohl bei Kernspaltung als auch bei Fusion wird Energie freigesetzt, wie man dieser Skizze entnehmen kann. Die beiden Vorgänge sind einander aber gewissermaßen entgegengesetzt.

Kerne im Gegensatz zu den Neutronen elektrisch geladen sind, so daß sie sich abstoßen und dadurch nur schwer zusammenkommen, um miteinander zu verschmelzen, zu »fusionieren«. Die einzige Methode zur Verschmelzung der Kerne besteht darin, sie in so schnelle Bewegung zu versetzen, daß sie trotz der elektrischen Abstoßungskräfte aufeinandertreffen. Die Atome eines Stoffes in sehr schnelle Bewegung zu versetzen bedeutet aber, sie auf extrem hohe Temperatur erhitzen – auf viele Millionen Grad. Nur bei derart hohen Temperaturen bewegen sich die Kerne schnell genug, um zusammenzuwachsen und Fusionsenergie freizusetzen.

Sobald natürlich eine nennenswerte Menge von Kernen zur Fusion gelangt und dabei Energie abgibt, steigt dadurch die Temperatur noch höher, die Kerne fusionieren schneller, und wir haben die Grundbedingung für die Fortpflanzung einer Kettenreaktion. Bei diesen Fusionsprozessen entstehen energiereiche Neutronen, die durch Auslösung weiterer Kernreaktionen die Temperatur noch stärker ansteigen lassen. Somit entstehen zwar Neutronen bei diesem Prozeß und erhöhen seine Intensität, sie spielen aber nicht die zentrale Rolle wie bei der Kernspaltung.

Das technische Problem für die Erzeugung von Fusionsenergie in großem Maßstab besteht darin, ein aus leichten Atomen bestehendes Gas, in erster Linie Wasserstoff, auf hohe Temperaturen zu bringen. Man nennt diesen Prozeß *thermonukleare Reaktion,* weil bei ihm eine nukleare oder Kern-Reaktion durch »thermische« Energie, also Wärme, hervorgerufen wird. Kein gewöhnlicher Behälter, sei er aus Stahl, Glas oder Beton, könnte den nötigen Temperaturen von weit über einer Million Grad widerstehen; es ist

also notwendig, die unglaublich heißen Atome durch irgendeine andere Methode zusammenzuhalten. Im gegenwärtigen Stadium thermonuklearer Forschung konzentrieren sich alle Anstrengungen darauf, mit Hilfe von magnetischen Feldern die heißen Atome auf einem begrenzten Raum festzuhalten.

Bei hoher Temperatur trennen sich durch die unablässigen Zusammenstöße der Wasserstoffatome untereinander ihre Elektronen ab; die Atome sind daher positiv geladen, und ihre Bewegung wird durch Magnetfelder stark beeinflußt.

Ein derartiges Gas aus heißen Atomen mit abgetrennten Elektronen nennt man *Plasma*. Entsprechend angeordnete Magnetfelder lassen die geladenen Atome in eng aufgewickelten Bahnen laufen, und man kann sich vorstellen, daß sie sich auf diese Weise trotz ihrer schnellen Temperaturbewegung in einem begrenzten Volumen halten lassen. Die Anordnung in Abbildung 39 ist ein Beispiel dafür, wie man heute die Frage zu beantworten versucht, auf welche Weise sich ein heißes Plasma zusammenhalten läßt.

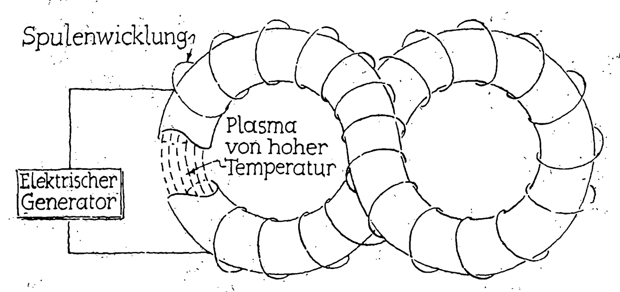


Abb. 39. Viele jetzt durchgeführte Experimente befassen sich mit der thermonuklearen Reaktion. Der schematisch hier abgebildete »Stellerator« stellt eine der für einen Fusionsreaktor vielleicht möglichen Lösungen dar.

Wir können uns gut vorstellen, welch großen technischen Aufwand es erfordert, um ein Plasma, das aus Kernen mit einer Million Grad besteht, auf engem Raum zusammenzuhalten. Wenn wir aber trotz der großen Schwierigkeiten eines Tages die thermonukleare Reaktion beherrschen, wird sie uns gegenüber der Kernspaltung viele Vorteile bringen. Einmal entsteht bei ihr nur eine geringfügige Radioaktivität, denn im Gegensatz zur Spaltreaktion treten bei ihr keine radioaktiven Überreste auf. Außerdem erhält man das »Brennmaterial« für die Fusion – hauptsächlich Wasserstoffisotope – leicht aus dem Meer. Und vielleicht ist es eines Tages sogar möglich, die elektrische Energie dem Plasma auf direktem Wege zu entnehmen und nicht auf dem Umweg über Wärme und Dampfturbinen, der bei den gegenwärtigen, auf der Kernspaltung beruhenden Atomkraftwerken unumgänglich ist.

Die Größe der zur Entwicklung der Kernfusion vor uns liegenden Aufgabe läßt sich aus der Tatsache abschätzen, daß es trotz jahrelanger intensiver Anstrengungen auf der ganzen Welt noch nicht gelungen ist, eine mit Sicherheit nachweisbare thermonukleare Reaktion zu erzielen. Es gibt viele Experimente mit heißen Plasmen, aber die bisher erreichten Temperaturen, die man allerdings nur schwer abschätzen kann, liegen noch unter einer Million Grad, sind also von den für eine wirkungsvolle thermonukleare Reaktion erforderlichen Werten noch weit entfernt. Selbst wenn man diese schließlich einmal erreicht hat, ist es noch ein gewaltiger Schritt bis zur Fertigstellung eines wirklichen thermonuklearen Reaktors, der mehr Energie erzeugt, als man ihm zur Aufrechterhaltung der Magnetfelder zuführen muß.

Auch haben wir noch nicht von den Kosten gesprochen. Wir müssen eines Tages elektrische Energie billiger erzeugen, als dies mit Kohle, Wasserkraft oder der Kernspaltungsreaktion möglich ist. Auf Grund unserer heutigen Kenntnisse läßt sich abschätzen, daß wir dieses Ziel kaum vor dem Ende dieses Jahrhunderts erreichen können, wobei wir nicht sicher sind, ob die Fusionsenergie wirklich einmal von wirtschaftlicher Bedeutung sein wird. Auf keinen Fall sollte aus Angst vor einer möglichen Konkurrenz mit der Kernfusion die Gewinung von Atomenergie aus der Kernspaltung in den nächsten Jahren vernachlässigt werden.

SCHLUSS

Wir kommen jetzt ans Ende unseres Buches, aber sicherlich nicht ans Ende der Geschichte des Neutrons. Schon jetzt hat es sich auf so vielen Gebieten bewährt, daß wir einige ganz weglassen mußten und andere nur ganz kurz anschneiden konnten. Unsere Betrachtungsweise ist im Vergleich zu der des Berufsphysikers vielleicht etwas primitiv, aber das Fehlen komplizierter mathematischer Formeln tut dem Wert unserer Geschichte keinen Abbruch. Wir wissen jetzt, welch enorme Beiträge zum technischen und wissenschaftlichen Fortschritt und für das Wohlergehen der Menschheit das Neutron bereits geleistet hat und noch leisten wird. Wir sind dem Neutron durch die Elektronenwolke des Atoms bis in den Kern der Materie gefolgt. Wir haben die erstaunlich spitzfindigen und komplizierten Methoden, die die heutigen Physiker auf der ewigen Suche nach der letzten Wahrheit anwenden, zwar nicht meistern, aber doch schätzen

gelernt. Wir haben jetzt einen gewissen Eindruck davon, wie außerordentlich verwickelt die Beziehungen zwischen den subatomaren Teilchen sind, wie wunderbar sich der Aufbau des Universums in der Welt des sehr Kleinen widerspiegelt. Seit der griechische Philosoph Demokrit (460 v. Chr.) zum erstenmal das Wort »Atom« für die kleinsten Teilchen verwendete, in die sich alle Stoffe zerlegen lassen, hat dieser Begriff die Gedanken der Menschen gefangengenommen. Heute sind wir sehr, sehr weit über die grobschlächtigen »Atome« hinaus vorgedrungen, wie sie sich Demokrit vorstellte; am Ende aber sind wir immer noch nicht. Eines fernen Tages mag der Mensch vielleicht auf dieses Ende stoßen und einen wirklich endgültigen Bericht über die Materie schreiben. Wenn das je der Fall ist, wird die Geschichte vom Neutron eines der ganz großen Kapitel darin sein.

LITERATURHINWEISE

Zwar wurde die Neutronenphysik bis jetzt hauptsächlich in wissenschaftlichen Zeitschriften behandelt, aber Einzelprobleme dieses Gebietes lassen sich auch in den hier aufgeführten populären Büchern weiterverfolgen.

Laura Fermi, Mein Mann und das Atom. Diederichs-Verlag, Düsseldorf 1956.

Eine lebendige Beschreibung der nichtwissenschaftlichen Seiten von Fermis Experimenten mit Neutronen und vom Bau des ersten Kernreaktors.

W. Heitler, Elementary Wave Mechanics. Oxford University Press, 2. Auflage, Oxford 1956.

Die ersten Kapitel behandeln klar und mit geringem mathematischen Aufwand den Dualismus von Wellen und Partikeln.

Diether Stolze, Den Göttern gleich – unser Leben von morgen. Verlag Kurt Desch, München 1958.

Grenzfragen der modernen Wissenschaft werden in diesem Werk verständlich gemacht.

D. J. Hughes, On Nuclear Energy. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1957.

Die Prinzipien der Kernspaltung, der Kettenreaktion und ihrer vielseitigen friedlichen Verwendungsmöglichkeiten werden in leichtverständlicher Weise beschrieben.

L. de Broglie, Die Elementarteilchen. Goverts-Verlag, Hamburg.

Eine Einführung in die Physik der gesamten Elementarteilchen und in die Quantenmechanik.



REGISTER

DER AUTOR

DONALD J. HUGHES, der Autor des Buches *Das Neutron* ist einer jener begabten jungen Physiker, die im zweiten Weltkrieg am Atombombenprojekt arbeiteten und dadurch mithalfen das Atomzeitalter einzuleiten.

Der vierundvierzigjährige Professor Hughes ist Chefphysiker am Brookhaven National Laboratory in Upton auf Long Island, wo er eine Arbeitsgruppe für Reaktorphysik leitet. Er ist Fulbrightprofessor der englischen Universitäten Oxford und Cambridge, hat bereits an fünfzehn wissenschaftlichen Instituten in Polen und der Sowjetunion Vorlesungen gehalten und war Delegierter der Vereinigten Staaten auf der zweiten internationalen Konferenz über die friedliche Nutzung der Atomenergie. »Das Neutron« ist sein sechstes Buch. Die Russen übersetzten bereits drei seiner anderen Werke und fanden eines davon so eindrucksvoll, daß sie eine Erstauflage von 20000 Exemplaren herausbrachten, eine für amerikanische Verhältnisse bei einem rein wissenschaftlichen Buch unglaubliche Zahl.

Professor Hughes wurde am 2. April 1915 in Chicago als Sohn eines Abteilungsleiters einer Telefonfabrik geboren. Er wollte ursprünglich Telefonkonstrukteur werden, gewann aber bei einem Physikwettbewerb den ersten Preis, ein Stipendium an der Universität Chicago und fand so zu seinem wahren Beruf. Nach seiner Promotion zum Dr. phil. im Alter von fünfundzwanzig Jahren blieb er als Lehrer an der Universität. Seine Doktorarbeit hatte sich mit der kosmischen Strahlung befaßt, und so nahm er

1941 an einer Expedition nach Südafrika zur Erforschung der kosmischen Strahlung teil.

1942 berief ihn die Marine als Leiter einer Abteilung für Unterwasserforschung ins Naval Ordnance Laboratory (Marine-Artillerie-Laboratorium) nach Washington. Anfang 1943 schloß er sich dem »Manhattan-Projekt« der Universität Chicago an, als der erste Kernreaktor in Betrieb genommen werden sollte. 1944 ging er nach Hanford im Staat Washington, wo im Rahmen des Manhattanprojektes große Reaktoren zur Erzeugung von Plutonium errichtet wurden. 1945 ernannte ihn die Atomenergiekommission zum Direktor der Abteilung Kernphysik am Argonne National Laboratory in Chicago. 1949 ging er dann nach Brookhaven.

Am Argonne National Laboratory entwickelte Professor Hughes in Zusammenarbeit mit Dr. Wilbur D. B. Spatz und Dr. Norman Goldstein eine Methode zur Bestimmung von Wirkungsquerschnitten gegenüber schnellen Neutronen. Sie wurde zur Grundlage von Professor George Gamows Theorie über die Entstehung der Elemente und fand Anwendung in der Entwicklung von Brutreaktoren mit schnellen Neutronen, wie zum Beispiel dem, der in Arco im Staat Idaho in Betrieb ist. Seine Arbeitsgruppe in Brookhaven brachte bedeutsame Arbeiten über Neutronen-»Spiegel« heraus, entwickelte den »schnellen Zerhacker«, der für die Untersuchung der Kerne von großer Wichtigkeit ist und erfand Methoden zum Arbeiten mit »kalten« Neutronen.

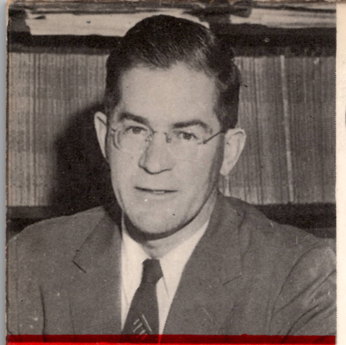
Seine bisher erschienenen Bücher sind: 1953 *Pile Neutron Research* (Neutronenforschung mit Kernreaktoren); 1954 *Neutron Optics* (Neutronenoptik); 1957 *Neutron Cross Sections* (Wirkungsquerschnitte

gegenüber Neutronen); 1957 *On Nuclear Energy* (Über die Kernenergie); und ein Kompendium *Neutron Cross Sections*, das die Government Printing Office (Staatliche Druckereianstalt) zur zweiten Genfer Konferenz veröffentlichte. Des weiteren publizierte er sowohl in allgemeinen als auch in wissenschaftlichen Zeitschriften.

Außerhalb des Laboratoriums entspricht Professor Hughes mehr der Vorstellung, die man sich von einem tüchtigen (und erfolgreichen) jungen Rechtsanwalt oder Arzt macht, als der Vorstellung von einem Physiker. Mit seiner jungen Frau Valerie und seinem Töchterchen wohnt er in Bellport auf Long Island, einem kleinen Ort an der Great South Bay. Er segelt leidenschaftlich gern und liebt Musik und Reisen. Seine Freunde wundern sich, woher er die Zeit nimmt, die er braucht, um all seinen Interessen nachgehen zu können.

TASCHENBÜCHER

IM VERLAG KURT DESCH



Dr. Donald J. Hughes, der während des Weltkrieges an den staatlichen Atomprojekten mitgearbeitet hat, ist ein führender Forscher auf dem noch sehr jungen Gebiet der Neutronenphysik. Früher war er Leiter der kernphysikalischen Abteilung des Nationalen Laboratoriums in Argonne, seit 1949 ist er Physiker im Brookhaven National Laboratory auf Long Island, N. Y. Er ist der Verfasser eines grundlegenden Werkes „Über die Kernenergie" und anderer naturwissenschaftlicher Bücher, die sich mit der Natur des Neutrons beschäftigen.



Das Neutron ist das wi
kungsvollste, nützlichst
und rätselhafteste unte
den grundlegenden Masse-Ener
gie-Partikeln, die den heutige
Physiker in ihren Bann ziehe
Der Autor gibt in diesem Buc
einen präzisen und verständl
chen Bericht über die Geschicht
der Kettenreaktionen des Neu
trons und sein verblüffendes Ve
halten. Das vielseitige Neutro
hat bereits in der Kernspaltung
im U-Boot-Antrieb und in der Er
zeugung neuer radioaktiver Sub
stanzen für medizinische un
industrielle Zwecke die Spure
seiner Wirksamkeit hinterlasse
aber die größten Hoffnunge
wird es in naher Zukunft au
einem anderen Gebiet erfüllen
dort, wo die Wissenschaftler mi
seiner Hilfe in die submikrosko
pische Welt einzudringen und de
ren Wesen zu erforschen suchen



KURT DESCH MÜNCHEN WIEN BASE

Eine Taschenbuch-Originalausgabe bei Desch